

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б. Н. ЕЛЫЦИНА

М. А. Денисов

**КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ.
ANSYS**

Учебное пособие

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2014

УДК 004.92(075.8)
ББК 32.973.202я73-1
ДЗ32

Рецензенты:

кафедра инженерной графики Уральского государственного горного университета
(заведующий кафедрой канд. техн. наук, д-р пед. наук Е. И. Шангина)
А. Г. Залазинский, заведующий лабораторией «Системного моделирования» Института
машиноведения Уральского отделения РАН РФ д-р техн. наук

Денисов, М. А.

ДЗ3 КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ANSYS : [учебное пособие] / М. А. Денисов.
Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 77 с.

ISBN 978-5-7996-1126-2

Учебное пособие представляет собой отдельно изданную вторую часть книги по компьютерному проектированию технических объектов. В нем описаны примеры использования современных технологий инженерного анализа конструкций тепловых устройств. Задачи анализа гидродинамики и теплообмена в камерах тепловых агрегатов рассмотрены на примерах применения программного комплекса ANSYS CFX со специальным интерфейсом ANSYS Workbench. Возможности анализа конструкций показывает разработанный учебно-справочный комплекс решений задач анализа термической прочности в программном пакете ANSYS Multiphysics.

Рекомендовано учебно-методическим советом ИММТ для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150400 «Металлургия» (уровень подготовки бакалавр и магистр) по специальностям «Компьютерная графика», «Компьютерные методы проектирования промышленных печей», «Компьютерные методы проектирования газоочистных устройств».

**УДК 004.92(075.8)
ББК 32.973.202я73-1**

ISBN 978-5-7996-1126-2

© Денисов М. А., 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ANSYS CFX	5
1.1. Область применения ANSYS CFX	5
1.2. Особенности вычислительного процесса в ANSYS CFX	6
1.3. Программы, используемые при расчетах в ANSYS CFX	8
1.4. Организация процесса вычислений в среде пакета Workbench	12
1.4.1. Графический интерфейс пользователя	12
1.4.2. Моделирование стационарного процесса в режиме быстрой установки параметров. Тепло- и массообмен в камере с горелкой «труба в трубе»	14
1.4.3. Моделирование стационарного процесса в основном режиме. Тепло- и массообмен в зоне нагревательной печи	31
1.4.4. Моделирование в программном пакете ANSYS 14. Камера с горелкой «труба в трубе»	47
Глава 2. ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ В ANSYS Multiphysics	52
2.1. Интерфейс пользователя	53
2.2. Этапы решения задач	55
2.3. Температурные напряжения при нагреве	60
2.4. Решение задач термпрочностного анализа	62
2.4.1. Температурные напряжения при стационарном теплообмене в металле. Пример параллельного сопряженного анализа	63
2.4.2. Температурные напряжения при нагреве металла. Параллельный сопряженный анализ	67
2.4.3. Последовательный сопряженный анализ стационарного теплообмена при определении температурных напряжений	71
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	76

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие представляет собой отдельно изданную вторую часть книги по компьютерному проектированию технических объектов. В первой части книги изложены основы компьютерного проектирования технических объектов. Там же рассмотрены системы автоматизированного проектирования на примерах, использующих систему проектирования «КОМПАС-3D».

В учебном пособии описываются примеры использования современных технологий инженерного анализа конструкций тепловых устройств. Первая глава рассматривает принципы инженерного анализа гидродинамики и теплообмена в программном комплексе ANSYS CFX и особенности проведения расчетных исследований. Эти задачи и расчеты часто очень сложны, и поэтому выполняются с использованием специального интерфейса ANSYS Workbench. Вторая глава представляет разработанный учебно-справочный комплекс решений задач анализа термической прочности в программном пакете ANSYS Multiphysics. Задачи ANSYS Multiphysics решаются в интерфейсе программного комплекса, что очень удобно при решении отдельных и сравнительно небольших задач. На примерах показаны особенности и возможности инженерного анализа конструкций проектируемых устройств. Технологии параметрического проектирования и оптимизации предполагается рассмотреть в третьей части учебного пособия.

Пособие разработано на кафедре инженерной графики ИНФО и кафедре теплофизики и информатики в металлургии ИММТ УрФУ.

Глава 1

ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ANSYS CFX

1.1. Область применения ANSYS CFX

Материалы работы [1] показывают большие возможности ANSYS Multiphysics по инженерному анализу в области CAE – технологий проектирования. Программный комплекс охватывает широкий круг задач теплофизического моделирования как тепловых устройств, так и других объектов, в которых тепловые процессы протекают одновременно с другими процессами. К сожалению, любой программный продукт имеет свои недостатки.

Возможности ANSYS Multiphysics (и большинства прочих пакетов) ограничены почти полным отсутствием методов моделирования переноса тепла излучением. Только иногда, используя угловые коэффициенты и считая среду лучепрозрачной, удастся делать какие-то расчетные оценки. А, например, в металлургии большинство агрегатов высокотемпературные, и энергия в них переносится главным образом излучением.

При решении трехмерных задач сопряженного теплообмена в объектах со сложной геометрией, требующих детального описания переноса тепла излучением и конвекцией, бесспорны преимущества программного комплекса ANSYS CFX перед другими пакетами программ. Пользователь, составляя программу расчета процессов в конкретном объекте, в частности, имеет возможность выбирать один из четырех методов решения уравнений радиационного теплообмена: метод Росселанда; метод π_1 ; метод Discrete Transfer; метод Монте-Карло. Выбор метода обеспечивает или ускорение вычислений, или увеличение точности результатов моделирования.

ANSYS CFX – это профессиональный аналитический комплекс для решения термо-, гидро-, газодинамических задач¹. В нем используется более 16 моделей турбулентности, комплекс использует модели многофазных потоков. Модель движения твердых частиц (Lagrangian Particle Transport) позволяет учесть дискретные примеси в однородном потоке. Модель многофазного тепло- и массообмена позволяет рассчитывать кипение, испарение и кавитацию. Применение движущихся сеток очень важно для моделирования меняющейся геометрии расчетной области: описание взаимодействия ротор-статор во вращающихся машинах; компрессоры, насосы.

Для расчетов процесса горения используется ряд моделей, описывающих диффузионное, кинетическое и смешанное горение. В том числе используются модели, основанные на предположении о вихревой вязкости; модель с предварительно сгенерированной химической таблицей; модель горения с

¹ Кроме CFX в состав ANSYS входит CFD пакет Fluent, обладающий большими возможностями моделирования теплофизических процессов. Эти возможности больше, чем у ANSYS CFX в расчете течений с горением, но меньше в расчетах теплообмена излучением.

детальной химией; Flamelet-модель для диффузионного горения; модель для предварительно перемешанного и смешанного горения; модель для расчета образования окислов азота; модель для расчета выхода сажи; модель двухфазного горения; модель процессов воспламенения.

В ANSYS CFX успешно решаются многие практические задачи. В том числе, моделируются задачи внешней аэродинамики средств транспорта, летательных аппаратов, движения сред и т. д. Строители определяют ветровые нагрузки и рассчитывают вентиляцию камер. Исследуются течение в каналах, многофазные течения, определяются гидравлические потери, решаются задачи сопряженного теплопереноса, задачи расчета напряженного состояния, прочности.

Программа ANSYS CFX может использоваться для расчета камер горения, горелочных устройств, образования продуктов горения и, в частности, окислов азота. Могут моделироваться процессы взрыва, может проводиться оптимизация конструкций агрегатов, теплообменников, рассчитываться трубопроводная и запорная арматура, реакторы, сепараторы, рациональные режимы работы тепловых устройств.

1.2. Особенности вычислительного процесса в ANSYS CFX

Решение задач в ANSYS CFX проводится аналогично решению задач в ANSYS Mytiphysics и проходит ряд стадий (этапов), показанных на рис. 1.1. Геометрия объекта должна создаваться в сторонней CAD-программе, и при первом знакомстве это может восприниматься негативно. Но данное неудобство компенсируется большими возможностями программы по экспорту и импорту данных. Например, удобно выполнять геометрические модели объектов в программе «КОМПАС-3D», сохранять их в формате Parasolid и экспортировать в программу ANSYS CFX.

Пример выполнения геометрической модели объекта показан на рис. 1.2. Модель выполнялась для частного расчета в составе CAE-анализа тепловой работы агрегата, и потому включает только часть толкательной нагревательной печи с методической и сварочной зонами. Сетка строится или в приложении пакета CFX-Mesh или в универсальном сеточном пакете ANSYS ICEM CFD. В примере получена сеточная модель (рис. 1.3, а).

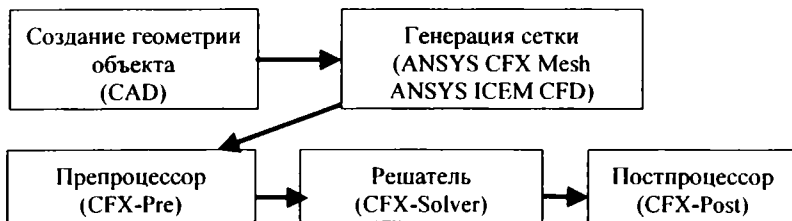


Рис. 1.1. Последовательность решения задач в ANSYS CFX

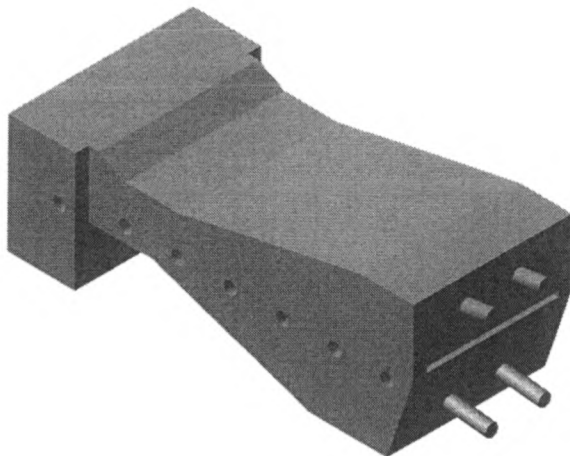


Рис. 1.2. Геометрическая модель участка методической нагревательной печи, выполненная в «КОМПАС-3D»

Затем в препроцессоре определяется «физика задачи» – задаются регионы типа INLET, через которые среда входит в объект; регионы типа OUTLET, через которые среда уходит из объекта; регионы типа WALL, к которым относятся поверхности, ограничивающие части объекта и т.д. Регионы поочередно выделяются курсором, и на них задаются граничные условия.

В схеме печи на рис. 1.2 моделями горелочных устройств считаются цилиндры с диаметром, равным диаметру горелочного туннеля. Соответственно торцы верхних цилиндров (горелок) стали регионом INLET1 со скоростью потока на входе 2,5 м/с и температурой 1500 °С. Торцы нижних горелок – регион INLET3 со скоростью дыма 3,5 м/с и температурой 1500 °С. Так как томильная зона на модели печи отсутствует, ее влияние учитывается в виде региона INLET2 со скоростью потока дыма (потока из-под пережима свода), заданной 0,3 м/с и температурой на входе этого потока 1200 °С.

Регионом OUTLET на модели печи стала нижняя плоскость дымоотводящего канала, для которой задано избыточное давление 0 Па. Кроме того, задан регион METAL, имеющий тип WALL, с поверхностями нагреваемого металла, на которых задано табличное распределение температуры кусочно-линейной функцией: координаты длины печи – 0 м, 5 м, 10 м, 15 м; соответствующие координатам температуры поверхностей металла – 303 К, 823 К, 1003 К, 1073 К. Регион WALL обозначил совокупность всех стен печи с заданными коэффициентом теплопередачи 21 Вт/(м² град) и температурой

окружающей печь среды, равной 30 °С. Степень черноты поверхностей задана $\varepsilon = 0,8$.

Совокупность труб составила регион TUBES, имеющий тип WALL. Температура поверхности труб задавалась таблицей аналогично температуре поверхности металла, но с пониженными значениями.

Расчеты теплообмена проводились с использованием модели турбулентности – К- ε , метода решения уравнения радиационного переноса – Discrete Transfer и приближения «серого» излучения. Свойства газа задавались соответствующими дымовому газу среднего состава при температуре 1000 °С. После задания граничных условий получена расчетная схема печи, показанная на рис. 1.3, б.

Далее, в соответствии со схемой на рис. 1.1, файл с постановкой задачи передается в решатель, результаты расчетов – в постпроцессор, где они обрабатываются и визуализируются.

1.3. Программы, используемые при расчетах в ANSYS CFX

Workbench ANSYS

При проведении инженерных анализов часто приходится использовать несколько программных продуктов. Некоторые из программ, использующихся в расчетах ANSYS CFX, указаны на рис. 1.1. В том числе используются CAD-пакеты для создания геометрической модели, препроцессор со специальными программами, генерирующими конечно-элементную сетку и организовывающими задание граничных условий, решатель и постпроцессор для отображения результатов расчета. Если программные продукты самостоятельны, то приходится организовывать передачу данных между ними. Решение многих задач резко усложняется, особенно при решении задач параметрического анализа и оптимизации.

Интеграцию программ и приложений в единый расчетный комплекс осуществляет специально разработанная компанией ANSYS платформа ANSYS Workbench 2.0. Платформа объединяет графический интерфейс приложений и обеспечивает их работу с базами данных в рамках одного проекта. Например, для работы с геометрией, генерации расчетной сетки, решения задач оптимизации ANSYS Workbench включает несколько специализированных модулей, таких как ANSYS DesignModeler, ANSYS Meshing и ANSYS DesignXplorer. Это позволяет создавать, связывать, проводить повторно расчеты в ANSYS CFX или ANSYS FLUENT, проводить параметрические исследования, легко выбирать тип анализа. Концепция расчета многодисциплинарных задач в единой рабочей платформе с поддержкой связи с CAD-системой уникальна и не имеет аналогов в иных программных продуктах.

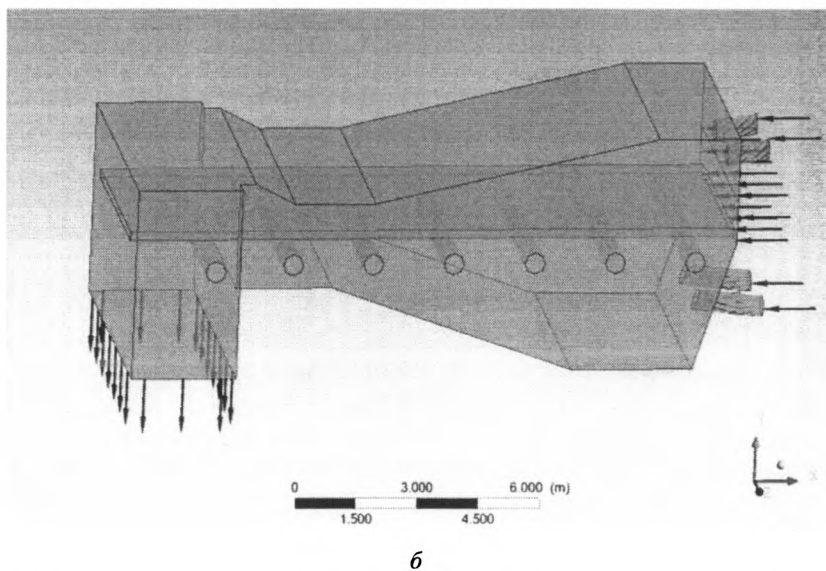
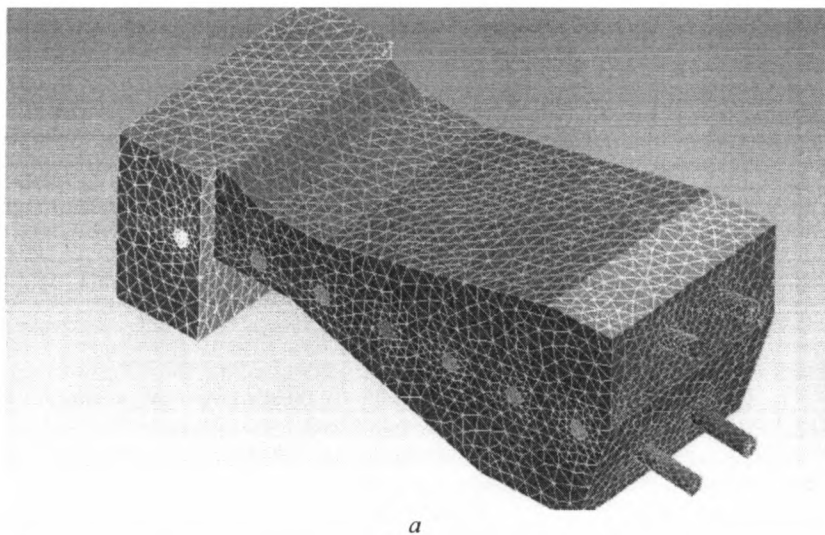


Рис. 1.3. Схема конечно-элементного разбиения расчетной области (а) толкательной печи и расчетная схема печи после задания граничных условий (б)

Программная среда ANSYS Workbench Simulation обладает рядом преимуществ, одно из которых – параметризация на основе ядра Parasolid. Эта возможность отсутствует при использовании классического препроцессора ANSYS. Соответственно появляется возможность двунаправленной интеграции с CAD системами и совмещения расчетов инженерного анализа с расчетами по оптимизации конструкции.

ANSYS Workbench Simulation несет и некоторые дополнительные функции. Одна из них – возможность разработки шаблона отчетной документации в соответствии с некоторым задаваемым стандартом.

Модули подготовки геометрии, работающие под программной платформой Workbench:

ANSYS DesignModeler

DesignModeler – универсальный CAD-редактор, в котором могут создаваться геометрические модели объектов, производиться их разбиения и упрощения. Как и в других редакторах, в DesignModeler поддерживаются все логические операции (вычитание, объединение) при работе с твердыми телами, операции выдавливания (*extrude*), вращения (*revolve*), протягивания (*sweep*) и др. при работе с эскизами (кривыми). Имеются процедуры создания фасок и галтелей на гранях твердого тела, в комплекс встроены готовые геометрические примитивы стандартных трехмерных фигур: сфера, тор, цилиндр, куб и пр.

В своей основе редактор имеет ядро Parasolid, которое позволяет создавать, редактировать и параметризовать геометрические модели объектов. Процесс моделирования отображается в древовидной схеме проекта. Редактор является модулем программы Workbench, который имеет связи со всеми основными CAD-системами, обеспечивающими простую передачу геометрии и параметров. Параметры в процессе работы можно менять, обновляя модель.

ANSYS Meshing

Одним из обязательных этапов моделирования является создание сетки. Качество сеточной модели влияет на точность, сходимость и скорость получения решения.

ANSYS Meshing позволяет генерировать сеточные модели для разных типов анализа (практически все области физики). Каждый из сеточных методов удовлетворяет специфическим требованиям той или иной области (механика деформируемых твердых тел, динамика текучих сред, электромагнетизм и др.), позволяет использовать упрощенную постановку задачи (оболочечные, двумерные и балочные модели).

ANSYS Meshing это многофункциональный сеточный препроцессор, позволяющий автоматически генерировать высококачественные расчетные сетки для различных приложений: для расчетов НДС, гидрогазодинамического анализа и пр.

Автоматизированные инструменты позволяют быстро построить расчетную сетку для новой геометрической модели – достаточно указать область

физики, и все необходимые настройки по умолчанию будут выбраны автоматически. Такой подход гарантированно позволяет создавать расчетную сетку с первой попытки. ANSYS Meshing поддерживает двунаправленную параметрическую связь с CAD-системами, поэтому при изменении любого параметра исходной CAD-геометрии сеточная модель будет автоматически обновлена.

Имеются инструменты для создания сетки под непосредственным управлением пользователя. Сеточные технологии ANSYS позволяют выбрать тип элемента или технологию, использующую несколько типов элементов одновременно. Пользователь самостоятельно может указать зоны геометрической модели и соответствующие типы элементов, что позволяет обеспечить высокую экономичность и адекватность численной модели.

ANSYS ICEM CFD

Данное приложение следует рассматривать как расширение возможностей ANSYS Meshing. Оно запускается независимо от ANSYS Workbench DesignModeler для работы со сложной геометрией объектов, для генерации сетки, исправления дефектов геометрической модели.

Можно выделить ряд возможностей программного комплекса ANSYS ICEM CFD, которые дают ему преимущества перед сеточным препроцессором ANSYS Meshing. Среди них эффективное разбиение больших моделей/сборок; конвертация сетки в различные форматы (более 100) для экспорта в CFD- и МКЭ-комплексы; генерация сетки для моделей с дефектами; построение высококачественных сеток на основе гексаэдров (структурированных/неструктурированных); работа при фасеточной геометрии, разрывах, наложении поверхностей.

ANSYS ICEM CFD содержит развитые средства диагностики сетки и разнообразные опции для редактирования и улучшения качества сетки. В ANSYS ICEM CFD встроен постпроцессор для обработки результатов CFD-расчетов и препроцессор, позволяющий на стадии генерации сетки определить граничные условия, свойства материалов и т. п.

Редактирование сетки является важным этапом при создании качественной сетки, поскольку проблемная сетка может привести к ошибкам при дискретизации уравнений и значительно ухудшить процесс сходимости задачи. В ANSYS ICEM CFD доступно два режима редактирования сетки: ручной и автоматический режимы. В автоматическом режиме выполняются такие операции, как сглаживание сетки, измельчение/укрупнение, объединение сеток с разной топологией элементов.

Отдельные технологии ANSYS ICEM CFD используются компанией ANSYS при совершенствовании единой «сеточной» платформы ANSYS Meshing.

1.4. Организация процесса вычислений в среде пакета Workbench²

Платформа **Workbench** интегрирует программные пакеты ANSYS в единую рабочую среду, обеспечивает взаимосвязь и передачу информации между отдельными блоками с разными видами анализа. Запуск платформы производится последовательным выполнением команд

Пуск → Все программы → ANSYS 12 → Workbench

После загрузки появляется рабочее окно программы, показанное на рис. 1.4.

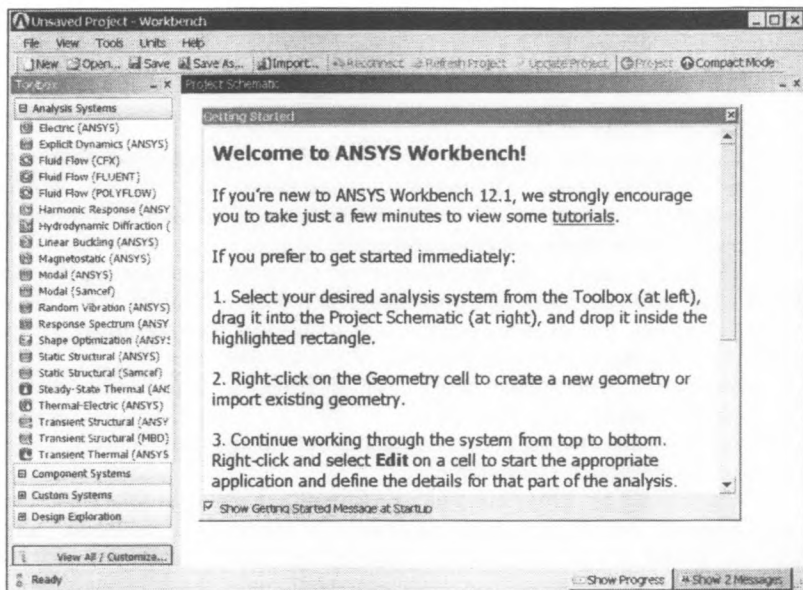


Рис. 1.4. Основное рабочее окно программы

1.4.1. Графический интерфейс пользователя

В центре рабочего окна программы расположена область **Схемы проекта** (*Project Schematic*), в которой формируется схема (последовательность) решения задачи. Здесь используется наглядное изображение прямоугольниками (блоками) отдельных видов анализа и схема проекта задает связи между блоками.

² Описание пакета Workbench делается на основе информационных материалов фирмы ANSYS и описаний разделов HELP, приведенных в программных пакетах версий ANSYS 12 и ANSYS 13.

Область в левой части окна **Инструментарий (Toolbox)** содержит «инструменты проекта», то есть раскрывающиеся списки разделов «системных шаблонов». На рис. 1.5 один из разделов *Analysis System* показан раскрытым, и видны составляющие раздел типы расчетных анализов, содержащихся в ANSYS. Ниже расположен раздел *Component Systems*, содержащий «системные шаблоны» – типовые блоки, на которые разбита процедура анализа. Раздел *Custom Systems* содержит алгоритмические блоки, в которых реализованы методы решения связанных задач, в том числе термомеханических задач, рассмотренных в учебном пособии М. А. Денисова «Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование» [1]. Раздел *Design Exploration* содержит алгоритмические блоки (шаблоны), позволяющие решать задачи оптимизации. Часть рабочего окна с открытыми списками перечисленных разделов показана на рис. 1.5.

Делая соответствующий выбор в меню **View**, можно открыть и другие окна. Например, окно *Properties* отображает свойства объектов, выделенных в области *схем проекта*. Окно сообщений *Messages*, расположенное в нижней части экрана, выводит информацию об ошибках, работе решателя, предупреждения и т. д.

Последовательность и содержание вычислительного процесса в каждом проекте задается блоками схемы проекта, дающей наглядное визуальное представление о процессе.

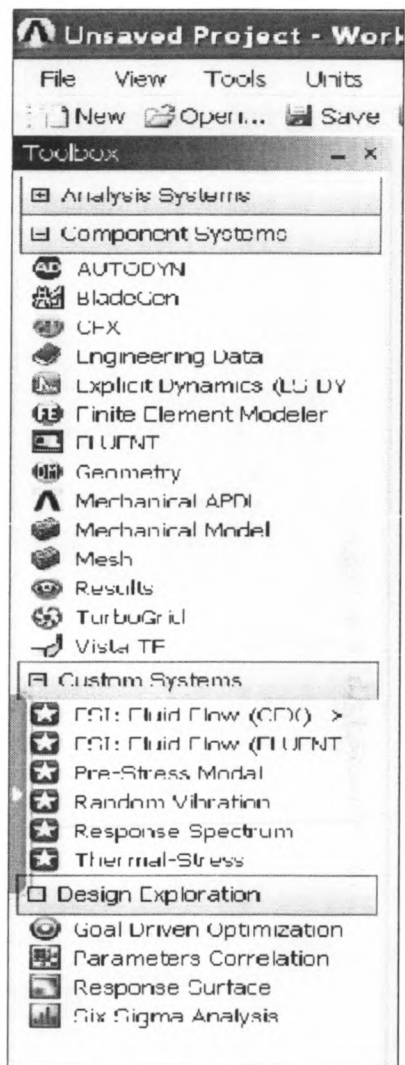


Рис. 1.5. Область окна *Toolbox*

1.4.2. Моделирование стационарного процесса в режиме быстрой установки параметров. Тепло- и массообмен в камере с горелкой «труба в трубе»

Постановка задачи

Цилиндрическая камера отопляется природным газом. Соосно камере на одном торце установлена горелка «труба в трубе», продукты горения удаляются через цилиндрическое отверстие в другом торце камеры (рис. 1.6).

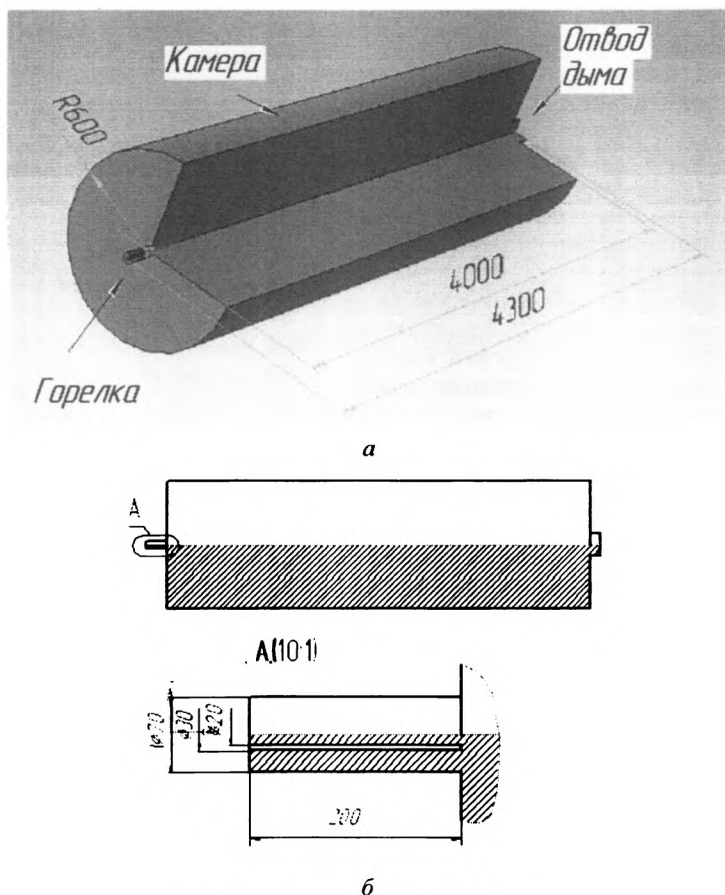


Рис. 1.6. Камера: а – схема; б – чертеж

На рисунке видно, что в рассматриваемой постановке задачи камерой считается ее рабочее пространство, ограниченное внутренней поверхностью кладки. Соответственно, «горелка» представляет собой два соосных канала.


Через внутренний цилиндрический канал в реальной горелке должен двигаться газ, а через наружный кольцевой канал – воздух горения.

Геометрическая модель камеры выполнена в программе «КОМПАС-3D» и сохранена в формате Parasolid. Файл с геометрической моделью перед началом вычислений размещен на компьютере с программой ANSYS CFX в папке *C:\calc CFX* под именем «Burner tube in tube». На рис. 1.6 к модели камеры добавлен вырез для удобства простановки размеров.

Решение задачи в ANSYS CFX

Порядок решения

1. Подготовительные операции

Пуск → **Все программы** →
→ **ANSYS 12.0** → **Workbench** →
→ **Component System** (ЛКМ по
знаку ) → **CFX** (2 ЛКМ) →
→ **Mesh** (2 ЛКМ)


Появятся блоки **A** и **B** схемы проекта (рис. 1.7).

2. Импорт геометрии

Geometry (ПКМ по ячейке в блоке **B**) → **Import Geometry** →
→ **Browse** → **Открыть файл с геометрической моделью** (Здесь файл «Burner tube in tube») → **Mesh** (ПКМ по нижней ячейке блока **B**) → **Edit** → **Откроется окно Meshing** с геометрической моделью камеры стенда (рис. 1.8).

3. Задание регионов

– *Регион суммарного входного отверстия горелки:*

 **Regions** (ПКМ) → **Insert** →
→ **Composite 2D Region** →
повернуть модель при нажатом Scroll, сделать видимым горелочный торец камеры. **Выделить с помощью Ctrl окружность и кольцо на торце модели горелки** (рис. 1.9, а).
→ **Apply** (ЛКМ в окне Details View слева внизу) → ЛКМ по надписи «**Composite 2D Region 1**» (или ПКМ по этой надписи и выбрать **Rename**) → Вписать **Inlet** → **Enter** (рис. 1.9, б).

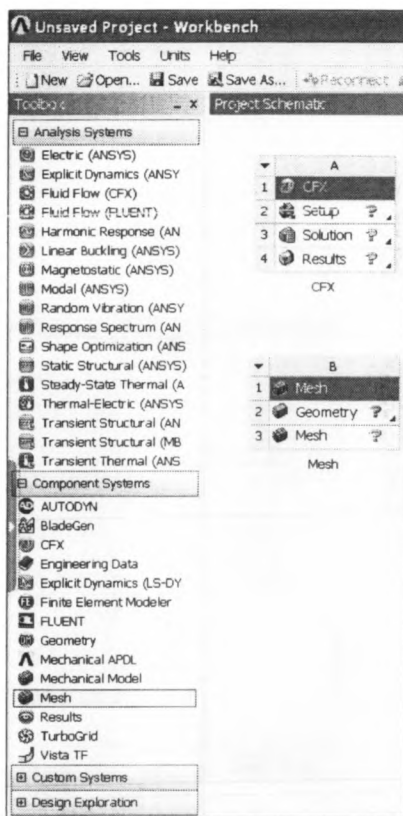


Рис. 1.7. Графическое окно со схемой проекта в начале счета в Workbench

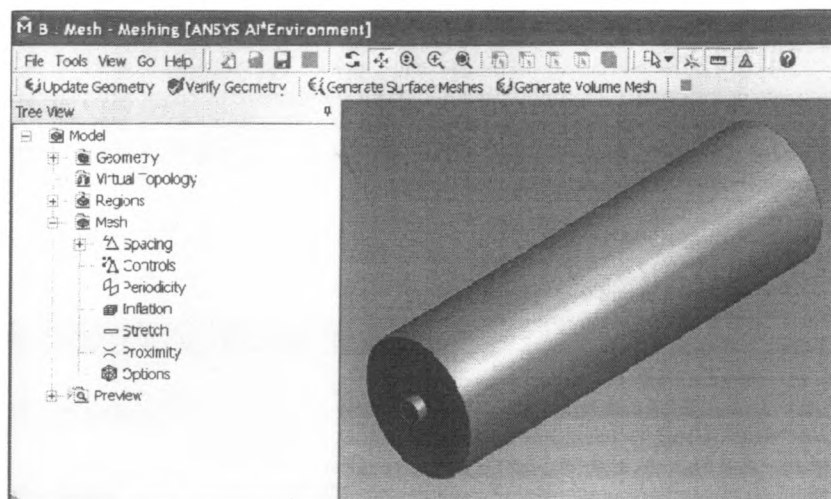
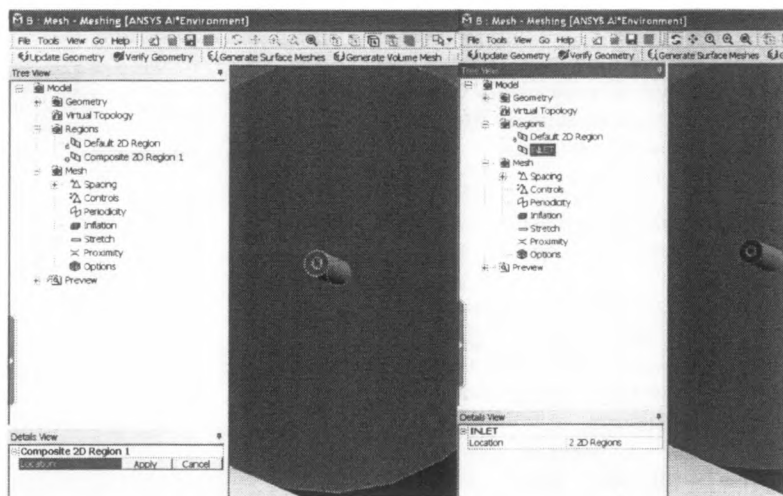


Рис. 1.8. Часть экрана с геометрической моделью стенда в сеточном генераторе



а

б

Рис. 1.9. Определение региона INLET:
а – выделение входных отверстий горелки; б – ввод имени региона

– *Регион выходного отверстия камеры:*
Regions (ПКМ) → Insert → Composite 2D Region →
 Повернуть модель при нажатом Scroll, сделать видимым выходное отверстие
 камеры. Выделить выходное отверстие
→ Apply (ЛКМ слева внизу) → ЛКМ по надписи «Composite 2D Region 1» →
Вписать Outlet → Enter.
 Изображение на графическом экране показано на рис. 1.10.

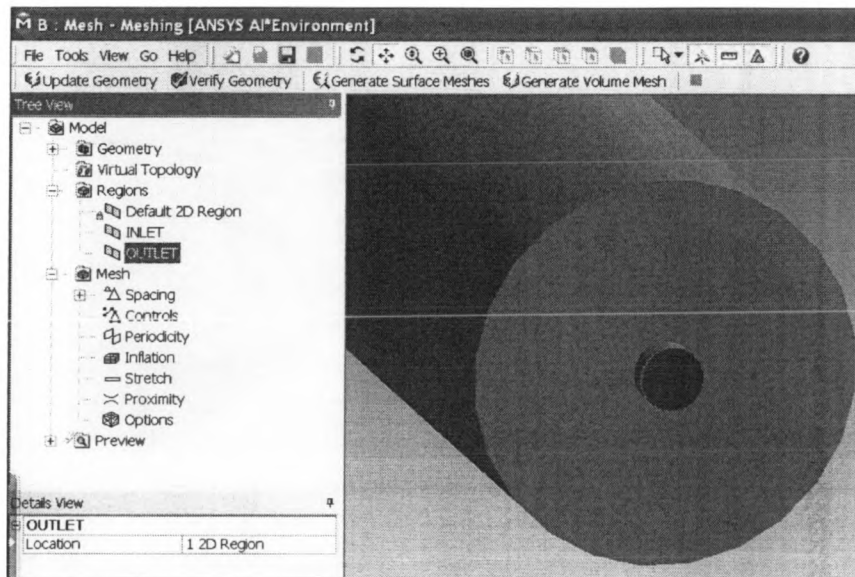


Рис. 1.10. Задан регион выходного отверстия камеры OUTLET

– *Регион стенки камеры:*
Regions (ПКМ) → Insert → Composite 2D Region →
 Выделить с помощью Ctrl поверхности, составляющие стенку камеры,
 используя Scroll.
→ Apply (ЛКМ слева внизу) → ЛКМ по надписи «Composite 2D Region 1» →
Вписать Wall → Enter.
 Вид экрана на стадии завершения задания региона Wall показан на рис. 1.11.

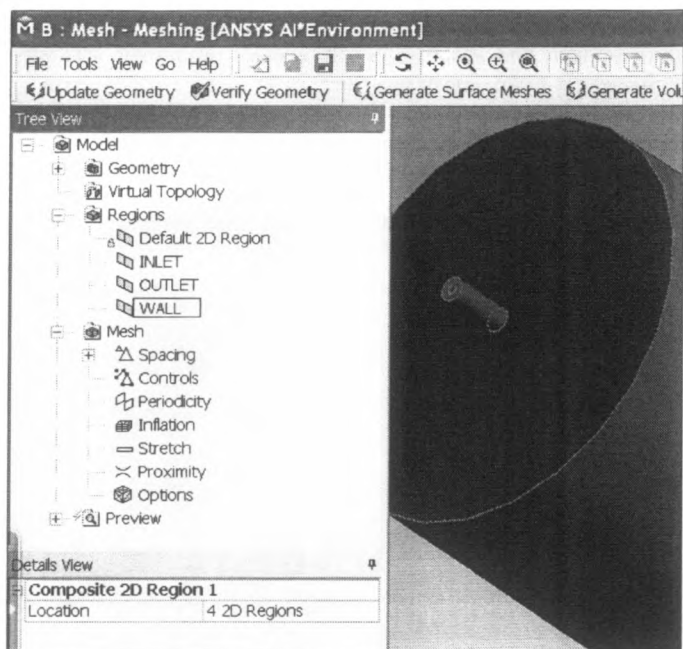




Рис. 1.11. Экран при завершении задания региона WALL

4. Задание сетки

Команды управления генерацией сетки расположены в разделе **Mesh** дерева проекта (**Tree View**).

 **Spacing** (ЛКМ по знаку  →

→ **Default Body Spacing** → В разделе **Details View** (слева) должно быть задано значение **Maximum Spacing**. Оставить значение 0.21, предложенное программой → **Enter**

→ **Default Face Spacing** → Оставить в разделе **Details View** значения, предложенные программой → **Enter**.

→ **Generate Surface Meshes** (над графическим окном) → Появилась сетка на поверхности модели.

→ **Generate Volume Mesh** (над графическим окном) → На экране появилась объемная сетка на модели камеры (рис. 1.12) и информация о параметрах сетки, общее число элементов которой равно 6410. Сетка, сгенерированная программой, состоит из ячеек с размерами, меняющимися по объему.

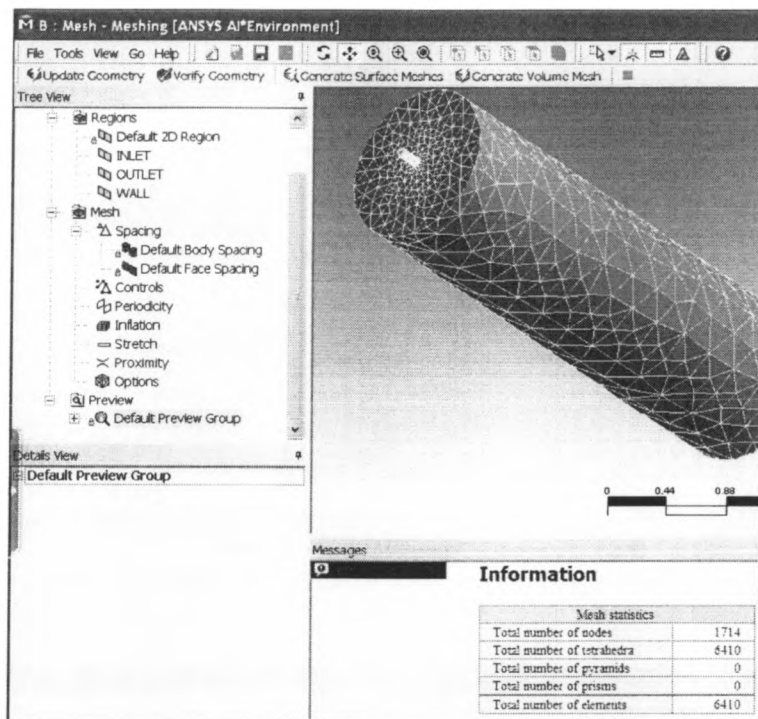


Рис. 1.12. Изображение объемной конечно-элементной сетки и информация о ее параметрах

5. Сохранение сетки, закрытие раздела, передача сетки в CFX

– **Сохранить** (вверху) → **Перейти в папку C:\calc.CFX**. Задать имя файла. Здесь: «GORELKA_GNP» → **Сохранить** при заданном типе файла Workbench Project Files (*.wbpj). Вид схемы проекта в графическом окне показан на рис. 1.13.

– **Mesh** (ЛКМ в блоке B, нажать и перетащить в ячейку A2, где Setup). Изменился вид схемы проекта (рис. 1.14) → **Setup** (ПКМ в ячейке B2) → **Edit** → **Предупреждение Workbench** → **OK** → **A:Mesh-Meshi...** (ЛКМ под графическим окном) →

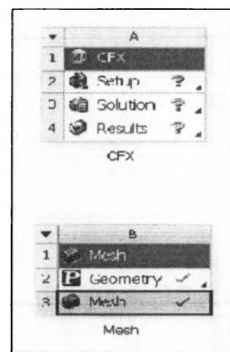


Рис. 1.13. Графическое окно со схемой проекта в начале счета в Workbench

☒Закрнуть (ЛКМ вверху справа). Закрывается сеточный генератор ANSYS Meshing →

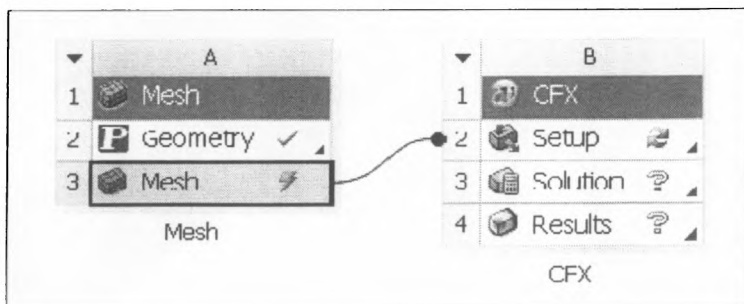


Рис. 1.14. Схема проекта с передачей данных

→ **Update Project** (ЛКМ над графическим окном) → **Предупреждение Workbench** → **OK** → **Setup** (ПКМ в ячейке B2) → **Edit**.

Выполнен переход в препроцессор CFX-CFX-Pre. Появилось изображение в рабочем окне, показанное на рис. 1.15.

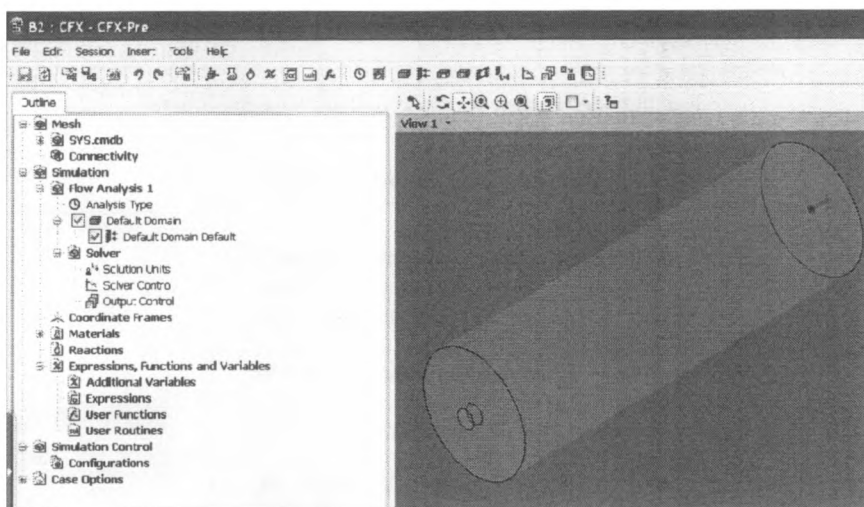


Рис. 1.15. Схема геометрии камеры с горелкой в препроцессоре

6. Задание материалов и математической модели

Tools (В меню **CFX-Pre**, показано на рис. 1.16) → **Quick Setup Mode** (Задается режим быстрой установки, где часть параметров определяется по умолчанию) →

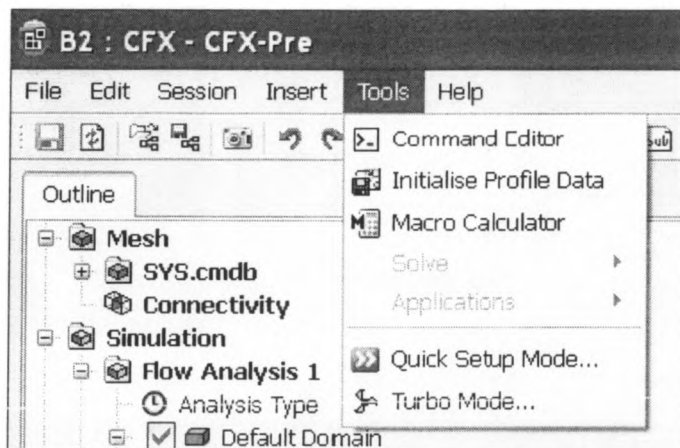


Рис. 1.16. Выбор режима быстрой установки параметров

→ **Вкладка Simulation Definition**. Задать значения:

Simulation Data – **Single Phase**; Выбрать рабочую среду (Working Fluid). Здесь Fluid – **Air at 25 C** (рис. 1.17, а) → **Next** →.

→ **Вкладка Physics Definition**. Задать значения:

Analysis Type – **Steady State**; Reference Pressure – **1 [atm]**; Heat Transfer – **Thermal Energy**; Turbulence – **k-Epsilon** (рис. 1.17, б) → **Next** →.

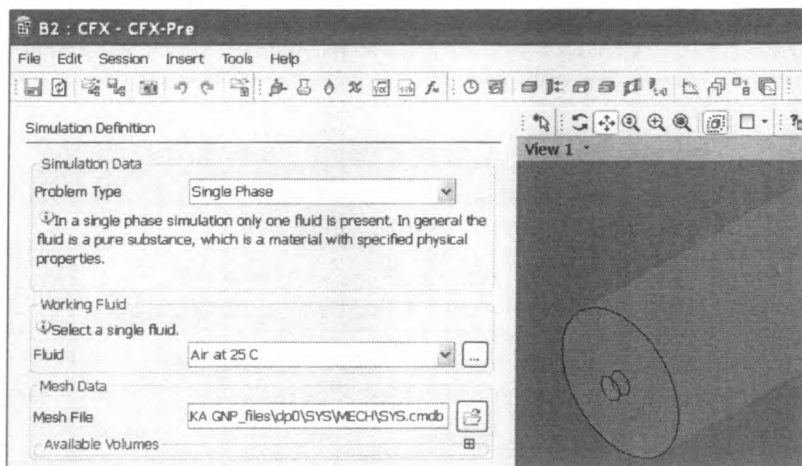
7а. Задание граничных условий

Default Domain Default (ПКМ) (рис. 1.18) → **Delete Boundary** (Удаляется информация, которая размещалась программой «по умолчанию») →

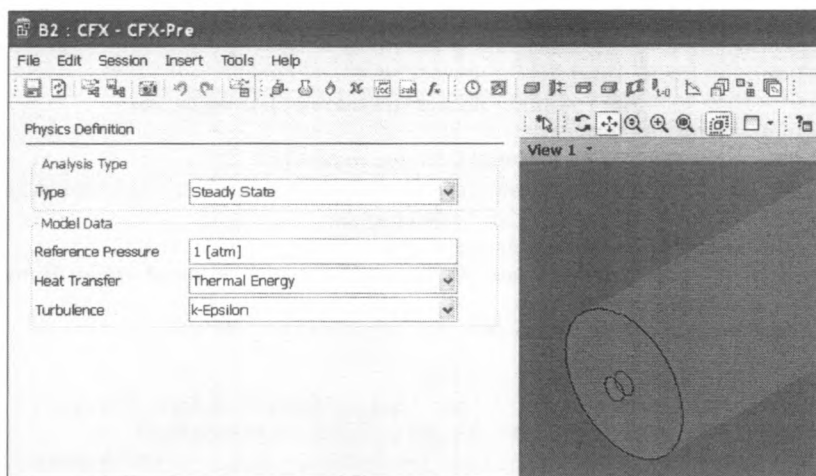
→ **Boundaries** (ПКМ в окне Boundary Definition слева) → **Add Boundary...** → ввести имя **INLET** в окно New Boundary → **OK** →

→ **Вкладка Boundary Definition**. Задать значения:

Boundary Type – **Inlet**; Location – **INLET**; Flow Specification – **Normal Speed**; Normal Speed – **20 m s⁻¹**; Static Temperature – **1500 C**. Вкладка показана на рис. 1.19.



a



б

Рис. 1.17. Задание параметров задачи: *a* – свойств среды во вкладке Simulation Definition; *б* – физической модели во вкладке Physics Definition

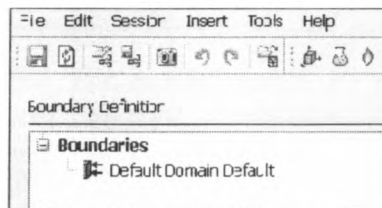


Рис. 1.18. Удаление информации «по умолчанию»

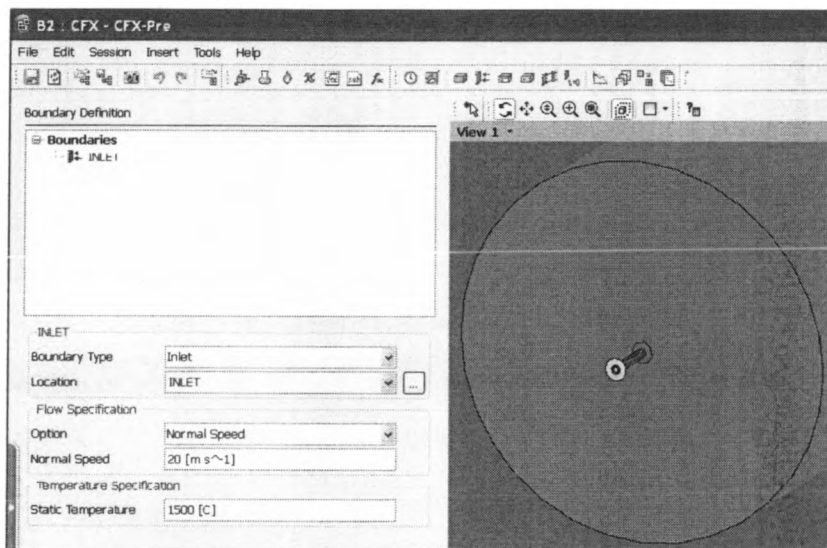


Рис. 1.19. Задание граничных условий в регионе INLET

→ **Boundaries** (ПКМ) → **Add Boundary...** → Ввести имя **OUTLET** → **OK** → **Вкладка Boundary Definition**. Задать значения: **Boundary Type** – **Outlet**; **Location** – **OUTLET**; **Flow Specification** – **Average Static Pressure**; **Relative Pressure** – **0 [Pa]**. Заполнение позиций вкладки показано на рис. 1.20.

→ **Boundaries** (ПКМ) → **Add Boundary...** → Ввести имя **WALL** → **OK** → **Вкладка Boundary Definition**. Задать значения: **Boundary Type** – **Wall**; **Location** – **WALL**; **Wall Influence On Flow** – **No Slip Wall**. Вид вкладки показан на рис. 1.21. → **Next**.

7б. Переход в основной режим

Ввести **Enter General Mode** (На вкладке **Final Operations**) → **Finish** (ЛКМ слева внизу). На рис. 1.22 показано текущее изображение на экране.

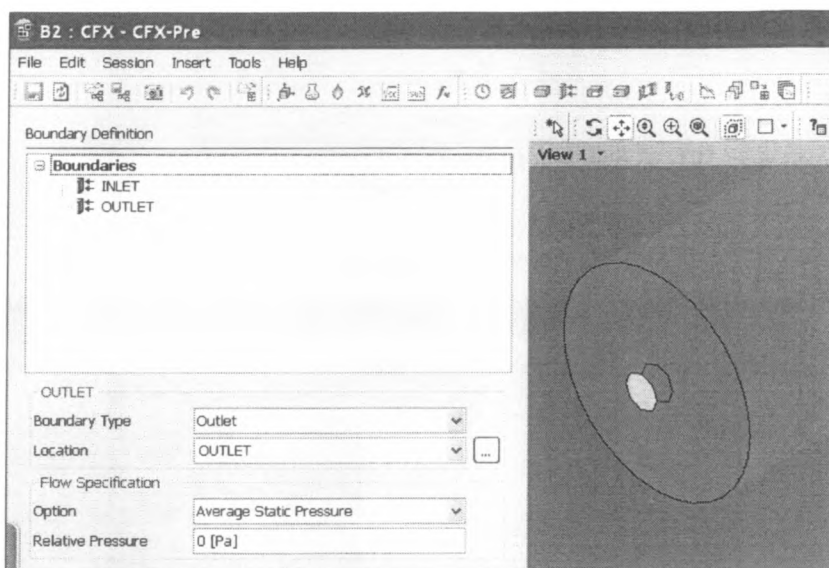


Рис. 1.20. Задание граничных условий в регионе OUTLET

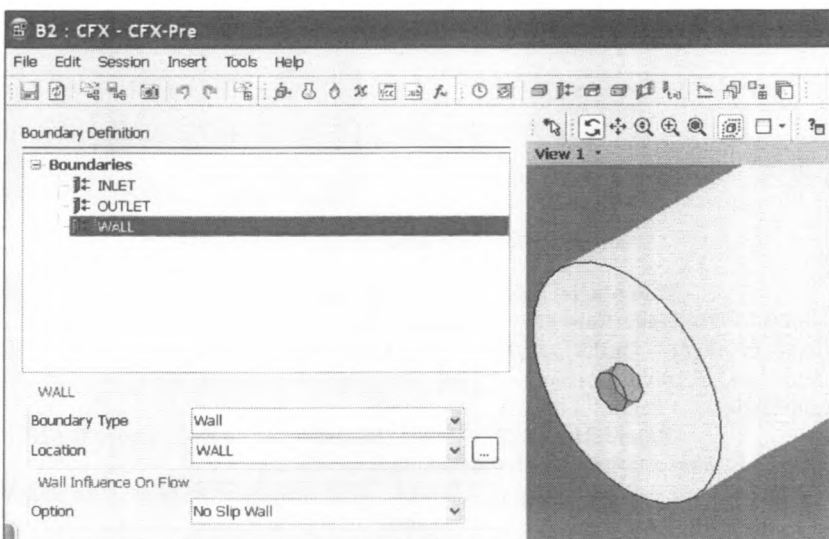


Рис. 1.21. Задание граничных условий в регионе WALL

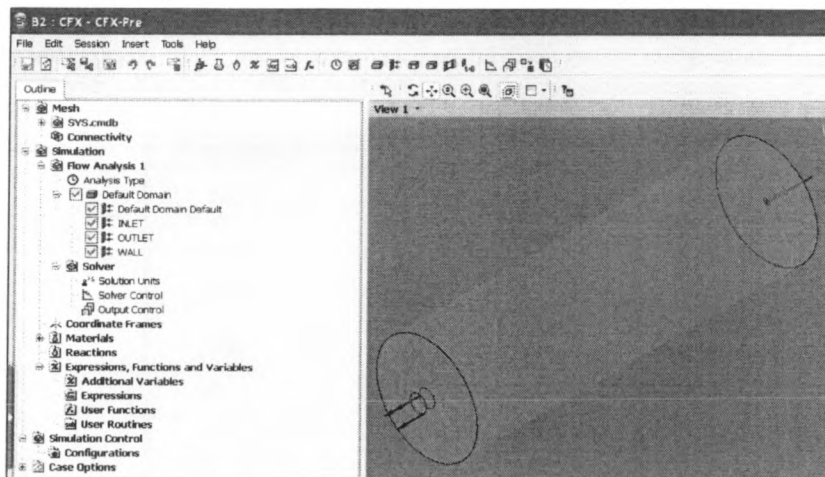



Рис. 1.22. Вид экрана после задания граничных условий

7в. Проверка данных расчета и закрытие препроцессора

Перед запуском вычислений исходные данные расчета должны проверяться. Делать это удобно после двойного щелчка ЛКМ по имени региона в разделе Default Domain вкладки Outline. При этом появляются соответствующие вкладки с граничными условиями, аналогичные рис. 1.19, 1.21. Вид вкладок соответствует основному режиму General Mode, поэтому информация в них более подробна, чем на рис. 1.19, 1.21.

→  Сохранить →  Закрыть (ЛКМ вверху справа).

В графическом окне появилась видоизмененная схема проекта (рис. 1.23)

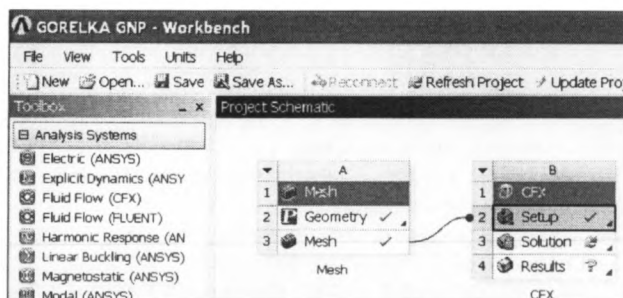


Рис. 1.23. Схема проекта после задания граничных условий

8. Запуск решения

→ **Solution** (2 ЛКМ по ячейке **B3** схемы проекта на рис. 1.23) → **Start Run** в появившемся диалоговом окне Define Run (рис. 1.24).



Рис. 1.24. Диалоговое окно запуска вычислений

Предупреждение. Если появилось сообщение ANSYS Workbench «The SFX Solver for system SFX did not produce a results file. No output file is available. Cell B3» → **OK**.

→ **Вакрыть** (ЛКМ вверху справа) → **Yes** (В ответ на предложение сохранить модифицированный проект).

На экране появилось окно Windows.

→ **Открыть файл** проекта в Windows:

C:/calc.CFX/GORELKA GNP_files/dpo/CFX/CFX/CFX.def →

Появляется диалоговое окно Define Run (рис. 1.24).

→ **Start Run**.

→ **Выполняются вычисления.** После их завершения появляется изображение на экране, показанное на рис. 1.25.

→ **Поставить птички** в разделах изображения ☒ Post-Process Results и ☒ Shut down CFX-Solver Manager → **OK.**

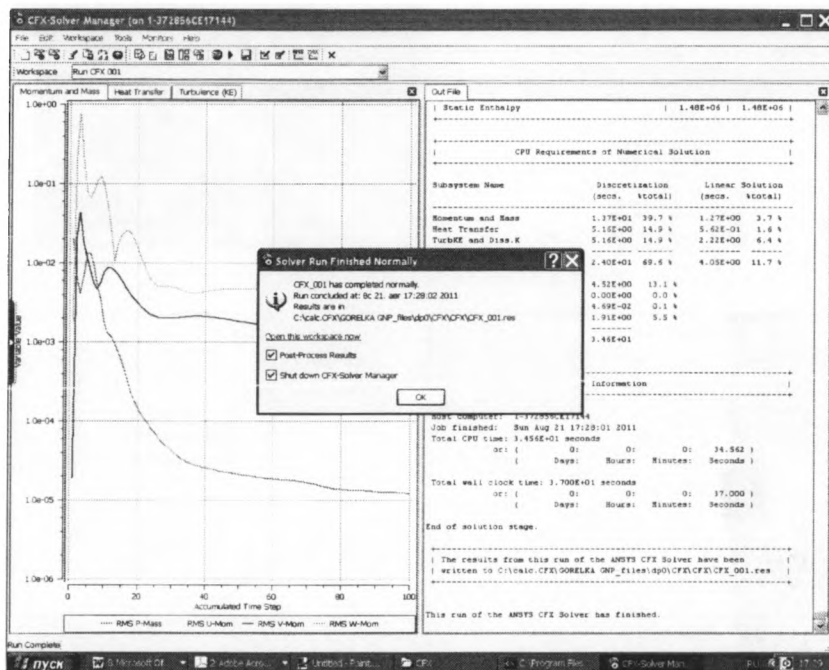


Рис. 1.25. Вид экрана после завершения счета

9. Просмотр результатов в постпроцессоре

Вид экрана после выхода в постпроцессор показан на рис. 1.26.

– **Построение линий тока газов в камере.**

Insert → **Streamline** (или нажать  в главном меню) → **Ввести имя объекта** (или согласиться с именем, предложенным программой) →

На вкладке Detail of Streamline ввести:

- в разделе Geometry параметры, показанные на рис. 1.27, а;
- в разделе Colour параметры, показанные на рис. 1.27, б → **Apply.**

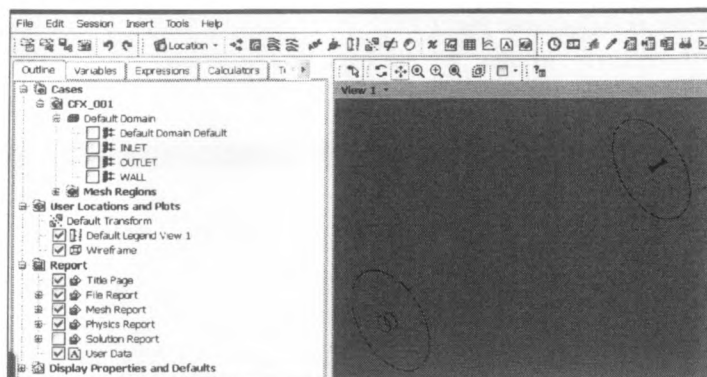
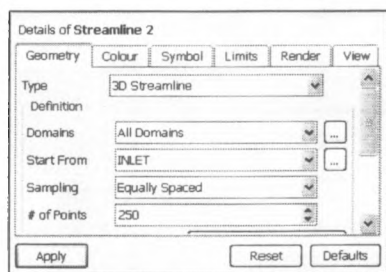
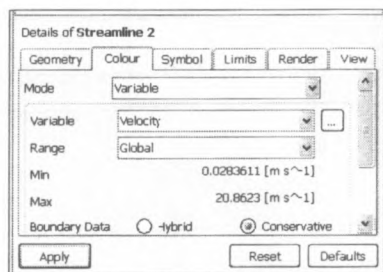


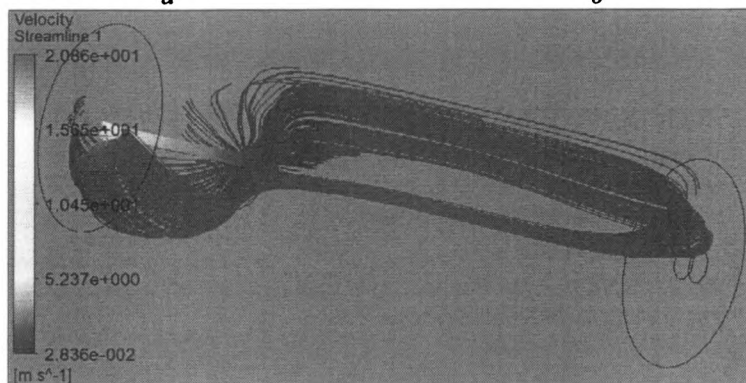
Рис. 1.26. Изображение на экране в постпроцессоре



a



б



в

Рис. 1.27. Построение линий тока газов в камере: *a* – ввод данных в окна раздела Geometry; *б* – ввод данных в окна раздела Colour; *в* – распределение линий тока в камере

Полученная объемная картина движения газов в камере показана на рис. 1.27, *в*. На рисунке видно, что в камере образовались два крупных контура циркуляции газов. В первом от горелки контуре газы движутся к выходу вдоль оси камеры, а во втором – вблизи стенок. На рис. 1.27, *в* для наглядности показана сначала только нижняя часть линий тока, а затем – только верхняя.

Построение поля скорости среды в среднем продольном сечении камеры

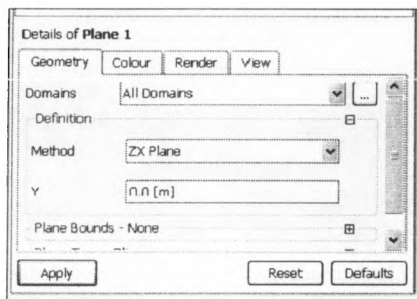
– Создание плоскости. В основном меню:

Insert → **Location** → **Plane**.

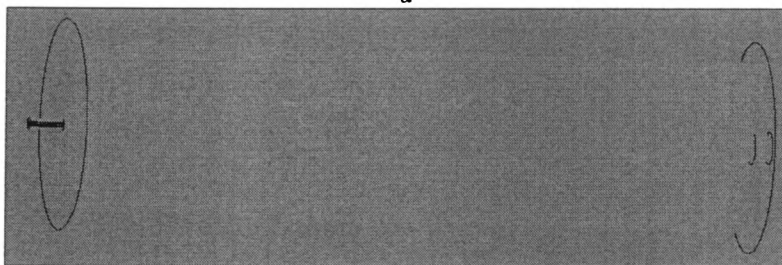
Задать имя плоскости **Plane1** → **OK**.

Задать в разделе Geometry вкладки Details of Plane1 (рис. 1.28, *а*):

Method – **ZX Plane**; Y – **0.0 [m]** – (начало координат проходит через ось камеры) → **Apply**. На изображении камеры в графическом окне появилась плоскость (рис. 1.28, *б*).



а



б

Рис. 1.28. Создание плоскости для построения изображений:
а – задание параметров плоскости; *б* – полученное изображение

– **Построение распределения скорости.** В основном меню:

Insert → **Contour** → (или нажать  в главном меню) → **Ввести имя объекта** (или согласиться с именем, предложенным программой) → **ОК**.

На вкладке слева внизу ввести:

Location – **Plane 1**; Variable – **Velocity**; и др. → **Apply**.

Распределение изолиний скорости среды в камере показано на рис. 1.29.

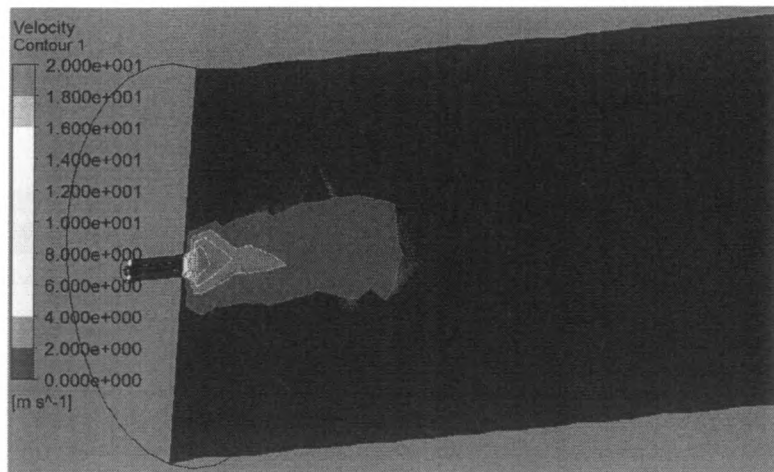


Рис. 1.29. Распределение изолиний скорости дымовых газов

– **Построение поля температуры в объеме камеры**

Убрать плоскость **Plane 1** распределение скорости в этой плоскости (Убрать птицы ☒ **Contour 1** и ☒ **Plane 1** в дереве на вкладке **Outline**).

Задать плоскость: **Insert** → **Location** → **Plane**.

Задать имя плоскости **Plane2** → **ОК**.

Задать в разделе Geometry вкладки Details of Plane2:

Method – **ZX Plane**; **X – 0.0 [m]**; → **Apply**.

На вкладке Details of ... внизу слева установить в разделе Geometry:

Locations – **Plane 2**; Method – **ZX Plane**; **Y – 0.0 [m]**; в разделе Colour:

Mode – **Variable**; Variable – **Temperature**; Range – **Global**;

Colour Scale – **Linear**; → **Apply**.

Полученное распределение температуры приведено на рис. 1.30. Из-за адиабатичности стенок температура распределилась по объему практически равномерно.

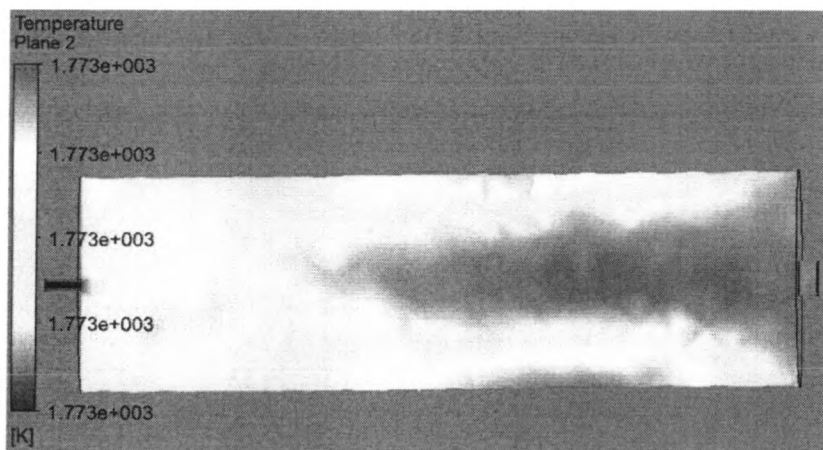


Рис. 1.30. Распределение температуры в объеме камеры

1.4.3. Моделирование стационарного процесса в основном режиме. Тепло- и массообмен в зоне нагревательной печи

Постановка задачи

Объектом исследования является зона нагревательной методической печи, отапливаемая природным газом через ряд горелок. Считается, что зона разделена вертикальными плоскостями симметрии между горелками на одинаковые по ширине печи части. Для одной из таких частей – электронной модели объекта (рис. 1.31, а) – выполняются расчеты.

Горелочное устройство в модели приближенно представлено цилиндрической амбразурой горелочного блока. Огневая камера на рисунке ограничена внутренней поверхностью кладки. Из «горелки» в камеру поступает дымовой газ среднего состава с балансовой температурой горения. Через пережим свода под горелкой в камеру поступают дымовые газы от зон печи, более удаленных от дымоотбора. На модели все газы удаляются из зоны через ее торец на стороне, противоположной горелкам.

Как и в примере параграфа 1.4.2, геометрическая электронная модель зоны печи выполнена в программе «КОМПАС-3D» и сохранена в формате Parasolid. Файл с геометрической моделью перед началом вычислений размещен на компьютере с программой ANSYS CFX в папке **C/calc CFX** под именем «PECH 11». Чертеж зоны с размерами показан на рис. 1.31, б.

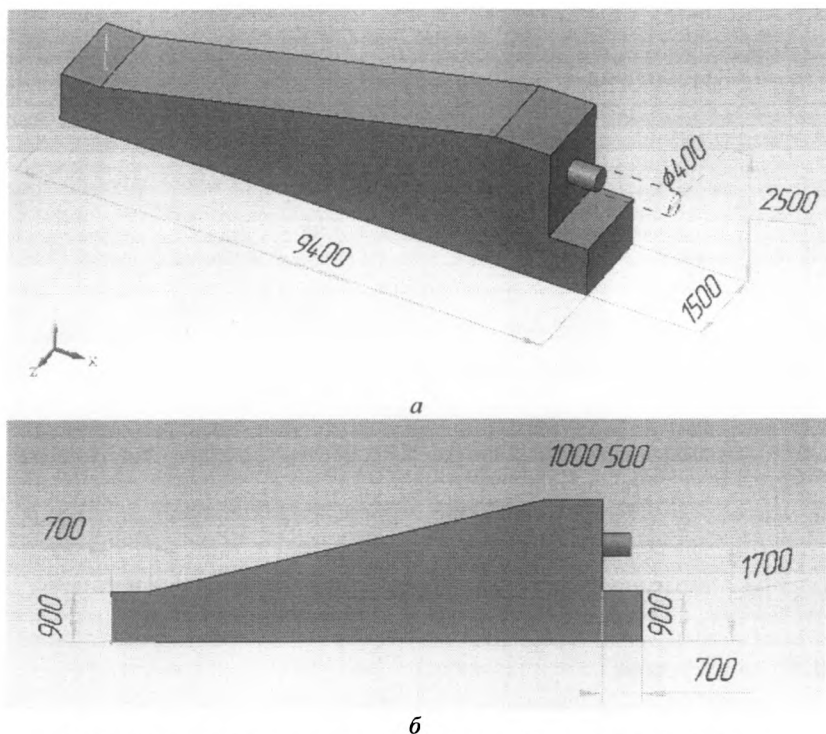



Рис. 1.31. Зоны печи: а – геометрическая электронная модель; б – чертеж вида

Решение задачи в ANSYS CFX

Порядок решения

1. Подготовительные операции

Пуск → Все программы → ANSYS 12.0 → Workbench →

→ Component System (ЛКМ по знаку ) → CFX (2 ЛКМ) → Mesh (2 ЛКМ)

Появятся блоки А и В схемы проекта.

2. Импорт геометрии

Geometry (ПКМ по ячейке в блоке В) → Import Geometry →

→ Browse → Открыть файл с геометрической моделью

(Здесь файл «РЕЧН 11.x_b») → Mesh (ПКМ по нижней ячейке блока В) →

→ Edit → Открылось окно Meshing с геометрической моделью зоны печи (рис. 1.32).

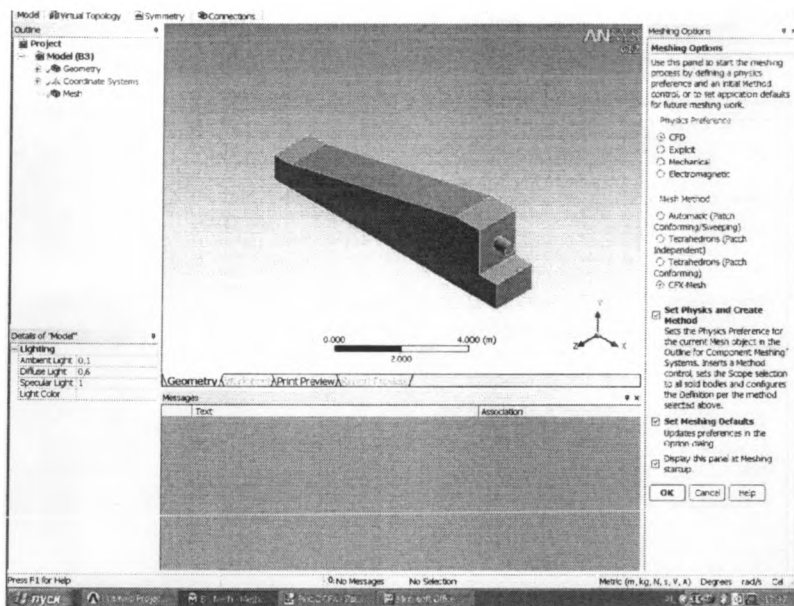


Рис. 1.32. Вид экрана после импорта в ANSYS CFX геометрии объекта из программы «КОМПАС-3D»

Предупреждение. При первом запуске делается выбор

☉ CFD...

☉ CFX-Mesh → OK

3. Задание регионов:

– *Регион входного отверстия горелки:*

☐ Regions (ПКМ) → Insert → Composite 2D Region (рис. 1.33, а) → Повернуть модель при нажатом Scroll, сделать видимым горелочный торец камеры. **Выделить окружность на торце модели горелки** (рис. 1.33, б). → Apply (ЛКМ в окне Details View слева внизу) → ЛКМ по надписи «Composite 2D Region 1» (или ПКМ по этой надписи и выбрать **Rename**) → Вписать Inlet1 → Enter.

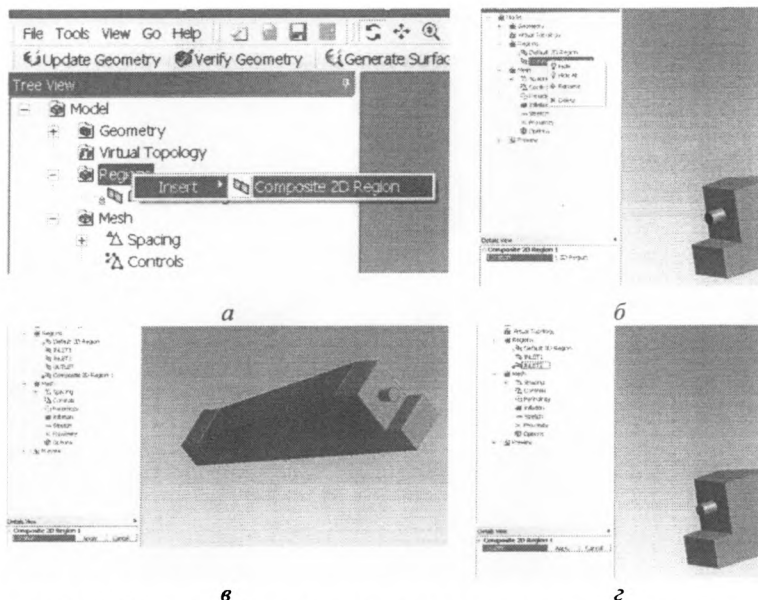


Рис. 1.33. Изменение вида экрана в процессе задания регионов: а – начальные операции для выбора региона; б – указание на модели объекта отверстия горелки как региона INLET1; в – указание на поверхности, образующих регион WALL1; г – сечение отверстия в пережиме зоны печи определится как регион INLET2


– *Регион входного отверстия под пережимом свода печи:*
Regions (ПКМ) → **Insert** → **Composite 2D Region** →
 Повернуть модель, сделав видимым входное отверстие под пережимом.
Выделить входное отверстие (рис. 1.33, б).
 → **Apply** (ЛКМ в окне Details View слева внизу) → ЛКМ по надписи «**Composite 2D Region 1**» (или ПКМ по этой надписи и выбрать **Rename**)
 → Вписать **Inlet2** → **Enter**.

– *Регион выходного отверстия зоны:*
Regions (ПКМ) → **Insert** → **Composite 2D Region** →
 Повернуть модель. **Выделить выходное отверстие**
 → **Apply** (ЛКМ слева внизу) → ЛКМ по надписи «**Composite 2D Region 1**»
 → Вписать **Outlet** → **Enter**.

– *Регион верхних внутренних поверхностей объема зоны на границе с кладкой печи:*
Regions (ПКМ) → **Insert** → **Composite 2D Region** →
 Выделить с помощью **Ctrl** поверхности, составляющие верхнюю поверхность камеры, используя **Scroll** (рис. 1.33, в).

→ **Apply** (ЛКМ слева внизу) → ЛКМ по надписи «**Composite 2D Region 1**»
→ Вписать **Wall1** → **Enter**.



– *Регион нижней внутренней поверхности зоны:*

 **Regions** (ЛКМ) → **Insert** → **Composite 2D Region** →
Выделить нижнюю поверхность зоны.

→ **Apply** (ЛКМ слева внизу) → ЛКМ по надписи «**Composite 2D Region 1**»
→ Вписать **Wall2** → **Enter**.

4. Задание сетки

а) В разделе **Mesh** дерева проекта (**Tree View**):

 **Spacing** (ЛКМ по значку  →

→ **Default Body Spacing** → Оставить в разделе **Details View** (слева) значение параметра **Maximum Spacing = 0.47 [m]**, предложенное программой → **Enter**

→ **Default Face Spacing** → Оставить в разделе **Details View** значения **Minimum Edge Length... = 0.024** и **Maximum Edge Length... = 0.47**, предложенные программой → **Enter**.

→ **Generate Surface Meshes** (Над графическим окном) → Появилась сетка на поверхности модели.

→ **Generate Volume Mesh** (Над графическим окном) → На экране появилась модель камеры с объемной сеткой (рис. 1.34, а) и информация о параметрах сетки, общее число элементов которой равно 2215.

б) Сетка, сгенерированная программой «по умолчанию», недостаточно подробна. Для увеличения точности расчетов размеры элементов сетки желательно уменьшить. Изменение параметров сетки:


→ **Default Body Spacing** → Задать **Maximum Spacing = 0.2 [m]** → **Enter**

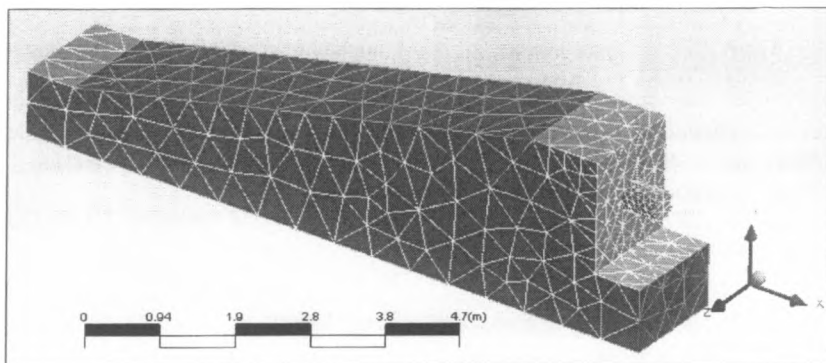
→ **Default Face Spacing** → Задать **Minimum Edge Length... = 0.024** и **Maximum Edge Length... = 0.25** → **Enter**.

→ **Generate Surface Meshes** → На модели появилась новая сетка.

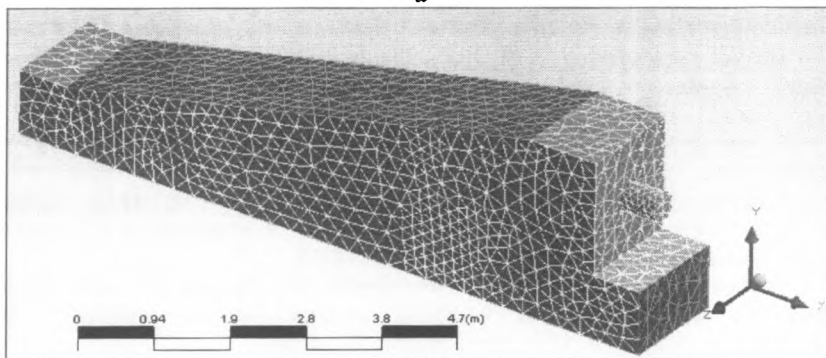
→ **Generate Volume Mesh** → Появилась модель камеры с объемной сеткой (рис. 1.34, б). Из информации в нижней части экрана следует, что общее число элементов сетки стало равным 25727.

5. Сохранение сетки, закрытие раздела, передача сетки в CFX

– →  **Сохранить** (вверху) → **Перейти в папку C/calc.CFX**. Задать имя файла. Здесь: «**ZONA PECH1**» → **Сохранить** при заданном типе файла **Workbench Project Files (*.wbproj)** →





a



б

Рис. 1.34. Изменение количества элементов в сетке в зависимости от величины параметров: *a* – общее число элементов 2215; *б* – общее число элементов 25727

→ 3  Mesh  (ЛКМ в блоке В, **нажать и перетащить** в ячейку А2, где **Setup**). Изменился вид схемы проекта → **Setup** (ПКМ в ячейке В2) → **Edit** → **Предупреждение Workbench** → **OK** → **A:Mesh-Meshi...** (ЛКМ под графическим окном) → ☒ **Вакрыть** (ЛКМ вверху справа). Закрывается сеточный генератор ANSYS Meshing → **Update Project** (ЛКМ над графическим окном) → **Предупреждение Workbench** → **OK** → **Setup** (ПКМ в ячейке В2) → **Edit**.
→ **Update Project** (ЛКМ над графическим окном) → **Предупреждение**

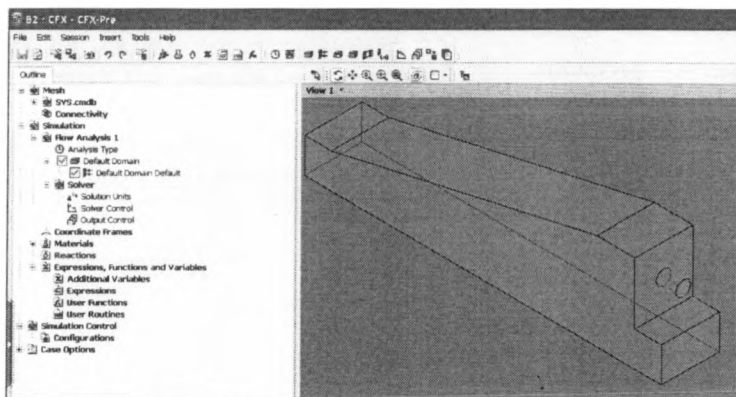


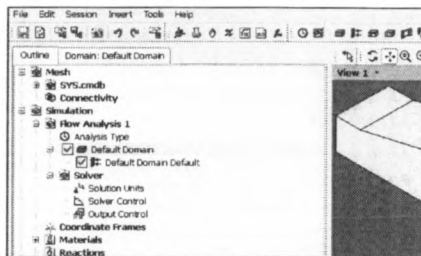
Рис. 1.35. Вид рабочего окна в препроцессоре

Workbench → OK → Setup (ПКМ в ячейке B2) → Edit.

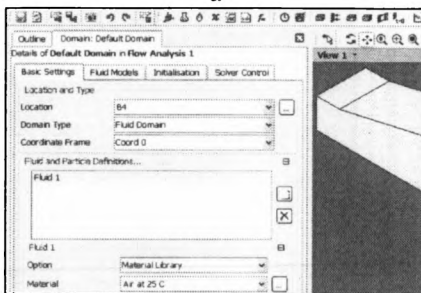
Выполнен переход в препроцессор CFX-CFX-Pre. Появилось изображение в рабочем окне, показанное на рис. 1.35.

6. Задание материалов и математической модели

Вкладка **Outline** (слева) – Раздел Simulation – Flow Analysis → **Default Domain** (ЛКМ) (рис. 1.36, а) → Появилось окно Details of Default Domain in Flow Analysis (рис. 1.36, б) с разделами опций настроек домена → Снова перейти на вкладку **Outline** → **Simulation** → **Materials** (ПКМ) → **Insert** → **Material** → В окне вставки материала ввести имя **Material1** → OK → Открылся раздел Basic Settings вкладки Material:Material1 → Перейти в раздел **Material Properties** вкладки → Установить: Option – **General Material**; термодинамические свойства: Option – **Value**; молярная масса Molar Mass – **31 kg/kmol**; плотность Density – **0.275 kg/m³**;



а



б

Рис. 1.36. Вызов вкладки настроек домена: а – первый шаг настройки, б – задание опций

теплоемкость Specific Heat Capacity – **поставить** ☒; в открывшемся окне – **1306 J/kg.K**; – **Constant Pressure**; Transport Properties – **ТКМ** **плюсу** **справа**; Dynamic Viscosity – **поставить** ☒; Dynamic Viscosity – **0.0000484 Pa.s**; Thermal Conductivity – **поставить** ☒; Thermal Conductivity – **0.109 W/m.K** → **ОК**. Вид вкладки после ввода данных показан на рис. 1.37.

Выбрать созданный материал:

→ Вкладка (рис. 1.38, а): **Domain: Default Domain** **Default Domain(2ЛКМ)** →

→ **Перейти в раздел Basic Setting** → **Установить**: В разделе Fluid1: Option – **Material Libraru**; Material – **Material1**.

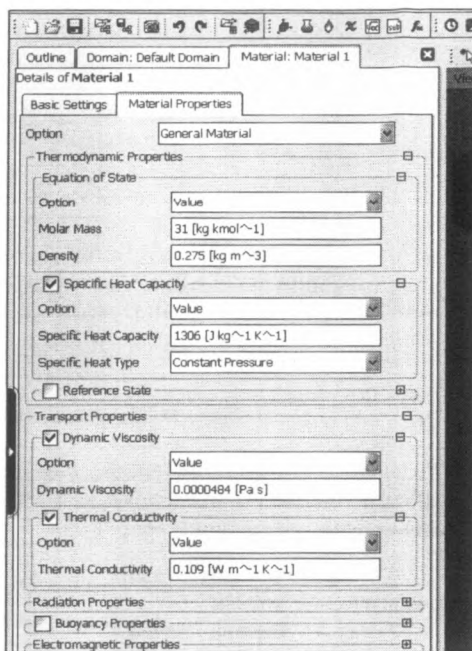


Рис. 1.37. Задание свойств создаваемого материала

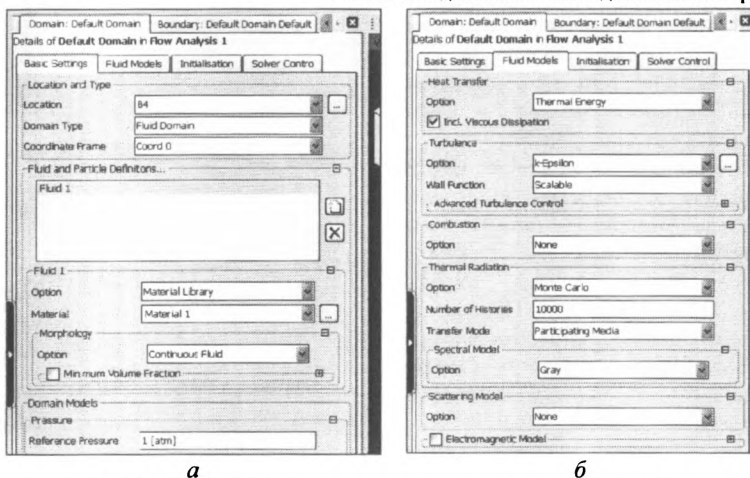


Рис. 1.38. Выбор созданного материала (а) и задание модели (б)


→ Вкладка **Fluid Models**:

Раздел Heat Transfer: Option – **Thermal Energy**; включить диссипацию вязкости Incl. Viscous Dissipation – **поставить** ☒;
 Раздел Turbulence: Option – **k-Epsilon**;
 Wall Function – **Scalable**; Combustion – **None**; Thermal Radiation – **Monte Carlo**;
 Number of Histories – **10000**; Transfer Mode – **Participating Media**; Spectral Model – **Gray**; Scattering Model – **None** → **OK**.

Раздел вкладки после заполнения показан на рис. 1.38, б.

7. Задание граничных условий:

– *Регион входного отверстия горелки:*

→  **Boundary** (над графическим окном) → Ввести имя **INLET1** → **OK**.

Раздел настроек **Basic Setting** вкладки **Boundary**: **INLET1** (рис. 1.39, а):

Boundary Type – **Inlet**;

Location – **INLET1**.


Раздел настроек **Boundary**

Details (рис. 1.39, б):

Flow Regime – **Subsonic**; Mass And Momentum – **Normal Speed**; Normal Speed – **2.65 m/s**; Turbulence – **Medium**

(Intensity = 5 %); Heat Transfer – **Static Temperature**; Static Temperature – **1500 C**; Thermal Radiation – **Local Temperature** → **OK**.

– *Регион входного отверстия под пережимом свода печи:*

→  **Boundary** → Ввести имя **INLET2** → **OK**;

Раздел настроек **Basic Setting** вкладки **Boundary**: **INLET2**:

Boundary Type – **Inlet**;

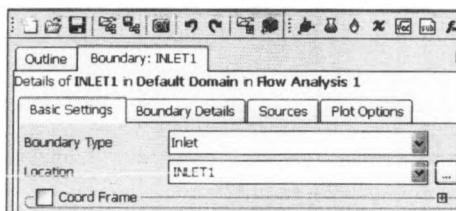
Location – **INLET2**.

Раздел настроек **Boundary**

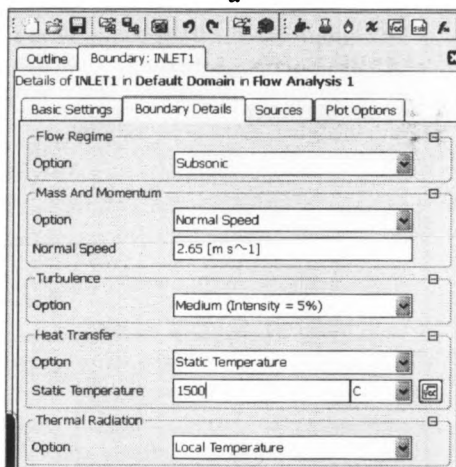
Details:

Flow Regime – **Subsonic**; Mass And Momentum – **Normal Speed**; Normal Speed – **0.1 m/s**; Turbulence – **Medium**

(Intensity = 5 %); Heat Transfer – **Static Temperature**; Static Temperature – **1200 C**; Thermal Radiation – **Local Temperature** → **OK**.



а



б

Рис. 1.39. Задание граничных условий для региона INLET1: а – опции раздела Basic Setting; б – опции раздела Boundary Details

– Регион выходного отверстия зоны:

→  **Boundary** → Ввести имя **OUTLET** → **OK**

Раздел настроек **Basic Setting**:

Boundary Type – **Outlet**; Location – **OUTLET**.

Раздел настроек **Boundary Details**:

Flow Regime – **Subsonic**; Mass And Momentum – **Average Static Pressure**;

Relative Pressure – **0 Pa**; – **0.05**; – **Average Over Whole Outlet**; – **Local**

Temperature → **OK**.

– Регион верхних внутренних поверхностей объема зоны на границе с кладкой печи:

→  **Boundary** → Ввести имя **WALL1** → **OK**.

Раздел настроек **Basic Setting**:

Boundary Type – **Wall**; Location – **WALL1**.

Раздел настроек **Boundary Details**:

Mass And Momentum – **No Slip Wall**; Wall Roughness – **Smooth Wall**; Heat

Transfer – **Heat Transfer Coefficient**; Heat Trans. Coeff. – **21 W/m²K**; Outside

Temperature – **25 °C**; Thermal Radiation – **Opaque**; Emissivity – **0.8**; Diffuse

Fraction – **1**; → **OK**.

– Регион нижней внутренней поверхности зоны:

→  **Boundary** → Ввести имя **WALL2** → **OK**.

Раздел настроек **Basic Setting**:

Boundary Type – **Wall**; Location – **WALL2**.

Раздел настроек **Boundary Details**:

Mass And Momentum – **No Slip Wall**; Wall Roughness – **Smooth Wall**; Heat

Transfer – **Temperature**; Fixed Temperature – **600 °C**; Thermal Radiation –

Opaque; Emissivity – **0.8**; Diffuse Fraction – **1**; → **OK**.

Текущее изображение на экране показано на рис. 1.40.

8. Закрытие препроцессора и запуск решения

→  **Сохранить** →  **Закрыть** (ЛКМ вверху справа).

В графическом окне появится видоизмененная схема проекта.

→ **Solution** (2 ЛКМ по ячейке **B3** схемы проекта) → **Start Run** в появившемся диалоговом окне Define Run. Более подробно запуск решения описан в примере п. 1.4.2, моделирующем процессы в камере, отапливаемой горелкой «труба в трубе».

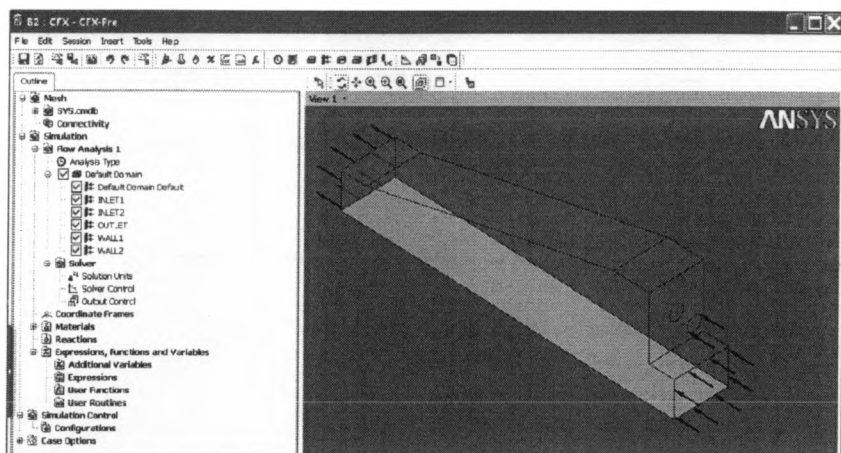


Рис. 1.40. Вид экрана после задания граничных условий

Предупреждение. Если появилось сообщение ANSYS Workbench «The SFX Solver for system SFX did not produce a results file. No output file is available. Cell B3» → **OK**.

→ ☒ **Вакрыть** (ЛКМ вверху справа) → **Yes** (В ответ на предложение сохранить модифицированный проект).

На экране появилось окно Windows.

→ **Открыть файл** проекта в Windows:

C:/calc.CFX/ ZONA PECHI_files/dpo/CFX/CFX/CFX.def →

Появляется диалоговое окно Define Run

→ **Start Run**.

→ **Выполняются вычисления.** После их завершения появляется сообщение о завершении счета. Текущее изображение на экране аналогично рис. 1.25.

→ **Поставить птички** в разделах изображения ☒ Post-Process Results и

☒ Shut down CFX-Solver Manager → **OK**.

9. Просмотр результатов в постпроцессоре

Вид экрана после выхода в постпроцессор показан на рис. 1.41.

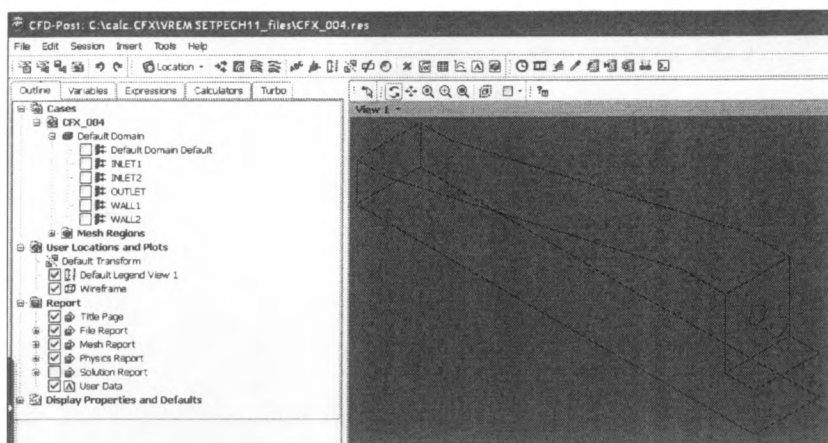


Рис. 1.41. Экран после выхода в постпроцессор

Построение поля скорости среды в среднем продольном сечении камеры

Ширина расчетного участка зоны печи 1,5 м. Среднее сечение – это плоскость (Plane), параллельная плоскости XY на расстоянии 0,75 м от начала координат по оси Z .

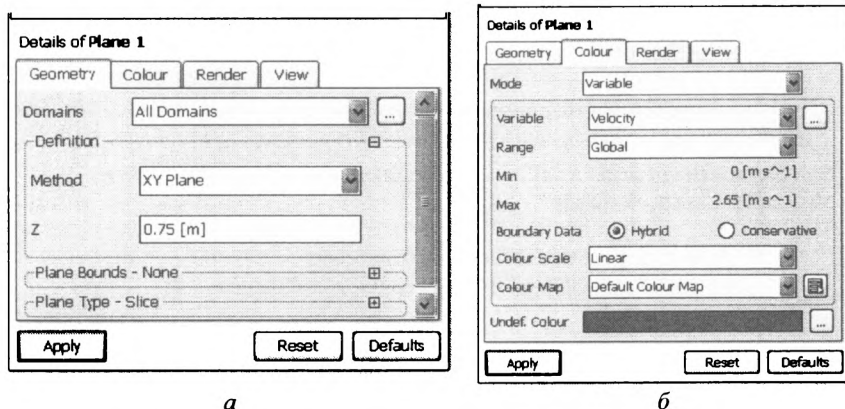


Рис. 1.42. Ввод данных в разделы вкладки для построения поля скорости:
а – раздел Geometry; б – раздел Colour

В основном меню:

Insert → **Location** → **Plane**.

В окне «Insert Plane» задать имя плоскости **Plane1** → **OK**. Слева внизу появилась вкладка «Details of Plane 1». На вкладке

в разделе Geometry задать (рис. 1.42, а):

Domain – **All Domains**; Method – **XY Plane**; Z – **0.75 [m]**.

в разделе Colour ввести (рис. 1.42, б):

Mode – **Variable**; Variable – **Velocity**; Range – **Global**; Colour Scale – **Linear**; Colour Map – **Default Colour Map**;

в разделе Render **поставить «птицу» у Show Faces**

→ **Apply**. При поиске наиболее удачного изображения может оказаться удобным иное положение объекта:

→ ПКМ в поле графического окна → **Predefined Camera** → **View Towards Z**.

Полученное изображение показано на рис. 1.43.

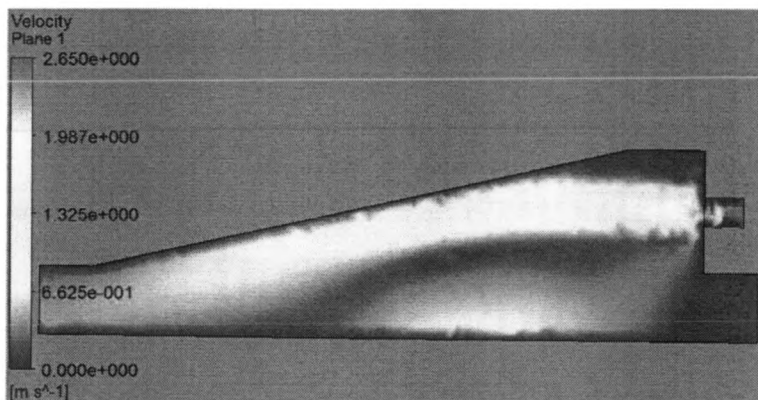


Рис. 1.43. Поле скорости газов в среднем продольном сечении зоны печи

Построение совмещенного поля векторов скорости и поля температуры

В основном меню:

Insert → **Vector**. Ввести имя **Vector2** → **OK**.

На вкладке Geometry ввести:

Domain – **All Domains**; Location → **Plane1**; Variable – **Velocity**.

На вкладке Colour ввести:

Mode – **Variable**; Variable – **Temperature**; Range – **Global**; – **Linear**; – **Default Colour Map**;

На вкладке Symbol ввести:

Symbol – **Line Arrow**; Symbol Size – **3** → **Apply**.

Полученное изображение показано на рис. 1.44.

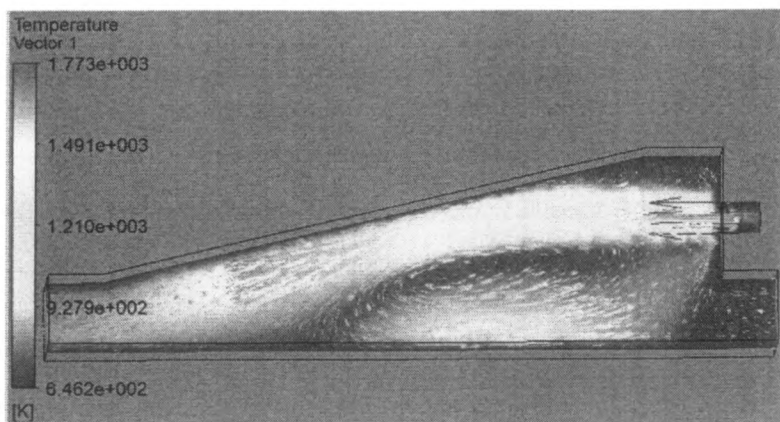


Рис. 1.44. Совмещенные поле векторов скорости и поле температуры

Вывод отчета по решению задачи

При нажатии ЛКМ кнопки **Report Viewer** (под графическим окном), на экран выводится отчет с параметрами проекта, показанный на рис. 1.45. Данные отчета легко встраиваются в документы Word копированием и вставкой данных. Полученный с использованием форматирования документ показан в таблице 1.1.

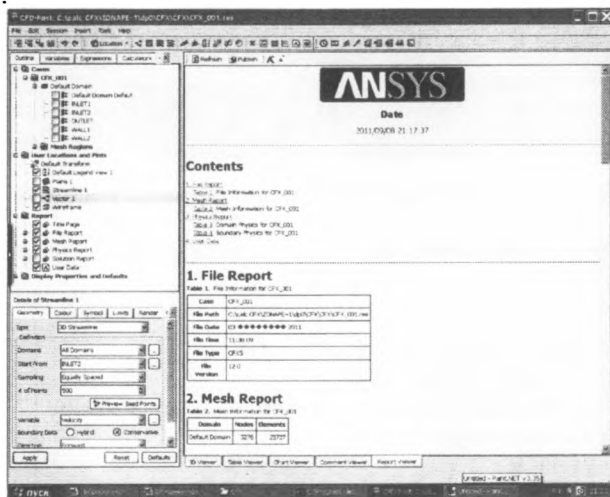


Рис. 1.45. Вывод отчета на экран

Пример оформления отчета по решению задачи

1. File Report

Table 1. File Information for CFX_001

Case	CFX_001
File Path	C:\calc.CFX\VREMSE-2\dp0\CFX\CFX\CFX_001.res
File Date	31 ♦♦♦♦ 2011
File Time	02:00:15
File Type	CFX5
File Version	12.0

2. Mesh Report

Table 2. Mesh Information for CFX_001

Domain	Nodes	Elements
Default Domain	5276	25727

3. Physics Report

Table 3. Domain Physics for CFX_001

Domain - Default Domain	
Type	Fluid
Location	B4
Materials	
Material 1	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
Settings	
Buoyancy Model	Non Buoyant
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
Heat Transfer Model	Thermal Energy
Thermal Radiation Model	Monte Carlo
Number of Histories	1.0000e+04
Radiation Transfer Mode	Participating Media
Spectral Model	Gray
Turbulence Model	k epsilon
Turbulent Wall Functions	Scalable

Table 4. Boundary Physics for CFX_001

Domain	Boundaries	
Default Domain	Boundary – INLET1	
	Type	INLET
	Location	INLET1
	Settings	
	Flow Regime	Subsonic
	Heat Transfer	Static Temperature
	Static Temperature	1.5000e-03 [C]
	Mass And Momentum	Normal Speed
	Normal Speed	2.6500e-00 [m s ⁻¹]
	Thermal Radiation	Local Temperature
	Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
	Boundary – INLET2	
	Type	INLET
	Location	INLET2

Settings		Продолжение табл. 1.1
Flow Regime	Subsonic	
Heat Transfer	Static Temperature	
Static Temperature	1.2000e+03 [C]	
Mass And Momentum	Normal Speed	
Normal Speed	1.0000e-01 [m s ⁻¹]	
Thermal Radiation	Local Temperature	
Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio	
Boundary – OUTLET		
Type	OUTLET	
Location	OUTLET	
Settings		
Flow Regime	Subsonic	
Mass And Momentum	Average Static Pressure	
Pressure Profile Blend	5.0000e-02	
Relative Pressure	0.0000e+00 [Pa]	
Pressure Averaging	Average Over Whole Outlet	
Thermal Radiation	Local Temperature	
Boundary – Default Domain Default		
Type	WALL	
Location	F6.4	
Settings		
Heat Transfer	Adiabatic	
Mass And Momentum	No Slip Wall	
Thermal Radiation	Opaque	
Diffuse Fraction	1.0000e+00	
Emissivity	1.0000e+00	
Wall Roughness	Smooth Wall	
Boundary – WALL1		
Type	WALL	
Location	WALL1	
Settings		
Heat Transfer	Heat Transfer Coefficient	
Heat Transfer Coefficient	2.1000e+01 [W m ⁻² K ⁻¹]	
Outside Temperature	2.5000e+01 [C]	
Mass And Momentum	No Slip Wall	
Thermal Radiation	Opaque	
Diffuse Fraction	1.0000e+00	

Emissivity
Wall Roughness	Продолжение табл. 1.1
<i>Boundary – WALL2</i>	
Type	WALL
Location	WALL2
<i>Settings</i>	
Heat Transfer	Fixed Temperature
Fixed Temperature	6.0000e+02 [C]
Mass And Momentum	No Slip Wall
Thermal Radiation	Opaque
Diffuse Fraction	1.0000e+00
Emissivity	8.0000e-01
Wall Roughness	Smooth Wall

1.4.4. Моделирование в программном пакете ANSYS 14. Камера с горелкой «труба в трубе»

Постановка задачи

В предыдущих разделах рассмотрены решения задач в системе Workbench программных пакетов ANSYS 12 и 13. В относительно новом пакете ANSYS 14 процедура решения задач имеет небольшие отличия, из-за которых учебные примеры приходится перерабатывать. Рассмотрим последовательность решения задачи из раздела 1.4.2 в Workbench пакета ANSYS 14. Это позволит выделить изменения в процедуре решения задач и учитывать эти изменения при использовании устаревших учебных материалов.

Порядок решения

1. Подготовительные операции

Workbench 14 → закрыть приветствие программы →
→ **Fluid Flow (CFX)** (2ЛКМ) →

Появится блок схемы проекта (рис. 1.46), в котором нужно поочередно выполнять последовательности действий, сгруппированные в строках блока. При этом будут исчезать вопросительные знаки в строках.

2. Импорт геометрии

Geometry (ПКМ по ячейке в схеме проекта) → **Import Geometry** →
→ **Browse** → **Открыть файл с геометрической моделью**
(Здесь файл «Burner tube in tube») → **Mesh** (ПКМ по ячейке в схеме проекта) →
Edit → **Откроется окно Meshing** с геометрической моделью камеры стэнда
(изображение на экране аналогично рис. 1.8).

3. Задание регионов

– *Регион суммарного входного отверстия горелки:*

▣**Model(A3) (ПКМ)** → **Insert** → **Named Selection** →

Повернуть модель при нажатом Scroll, сделать видимым горелочный торец камеры. **Выделить** с помощью **Ctrl** окружность и кольцо на торце модели горелки (изображение на экране аналогично рис. 1.9, а).

→ ПКМ (на поле вкладки **Outline**) → **Rename** → Вписать **Inlet** → **Enter**.

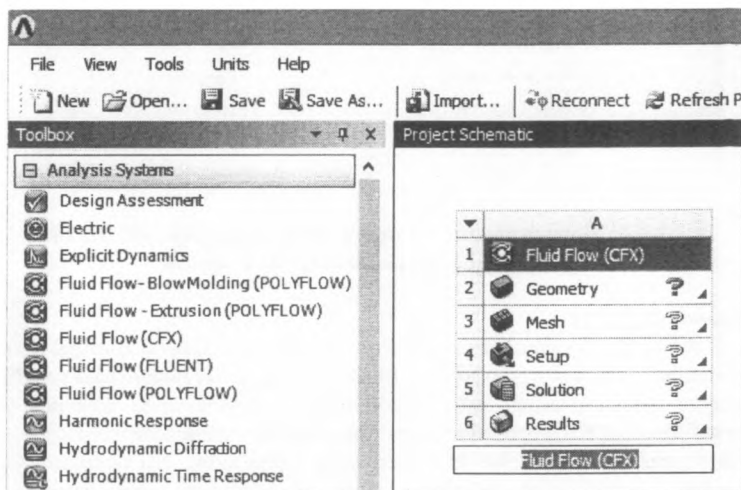


Рис. 1.46. Вид экрана со схемой проекта

– *Регион выходного отверстия камеры:*

▣**Model(A3)(ПКМ)** → **Insert** → **Named Selection** →

Повернуть модель при нажатом Scroll, сделать видимым выходное отверстие камеры. Выделить выходное отверстие

→ ПКМ (на поле вкладки **Outline**) → **Rename** → Вписать **Outlet** → **Enter**.

Изображение на графическом экране аналогично изображению, показанному на рис. 1.10.

– *Регион стенки камеры:*

▣**Model(A3) (ПКМ)** → **Insert** → **Named Selection** →

Выделить с помощью **Ctrl** поверхности, составляющие стенку камеры, используя Scroll.

→ ПКМ (на поле вкладки **Outline**) → **Rename** → Вписать **Wall** → **Enter**.

Вид экрана на стадии завершения задания региона Wall аналогичен изображению, показанному на рис. 1.11.

Для выбора поверхностей может использоваться инструмент

Units Tools Help

выбора (на панели сверху)



4. Задание сетки

→ ЛКМ по разделу **Mesh** в дереве проекта (на вкладке **Outline**) →

Ниже, во вкладке **Details of "Mesh"**, можно посмотреть параметры сетки в соответствующих разделах вкладки. Оставить значения параметров, заданные по умолчанию.

→ **Mesh** (открыть опции команды в меню сверху) → **Generate Mesh** →.

На экране появится сетка, сгенерированная программой. Во вкладке **Details of "Mesh"** (раздел **Statistics**) указано число элементов сетки 83190.

5. Сохранение сетки и передача ее в CFX

→ **Update** (кнопка с желтым значком в меню сверху) →

→ **File** → **Save Project** (при сохранении задать имя файла) → При необходимости перейти к схеме проекта, используя кнопки внизу экрана →

→ **Setup** (ПКМ в строке схемы проекта) → **Edit** →.

На экране появится изображение, аналогичное изображенному на рис. 1.15.

6. Задание материалов и математической модели

Tools (вверху экрана в препроцессоре **CFX-CFX-Pre**) → **Quick Setup Mode**. Задан режим быстрой установки параметров, где часть их определяется по умолчанию.

→ **Вкладка Simulation Definition**. Задать значения:

Simulation Data – **Single Phase**; Выбрать рабочую среду (**Working Fluid**). Здесь **Fluid** – **Air at 25 C** (изображение на экране аналогично рис. 1.17, а) → **Next** →.

→ **Вкладка Physics Definition**. Задать значения:

Analysis Type – **Steady State**; **Reference Pressure** – **1 [atm]**; **Heat Transfer** – **Thermal Energy**; **Turbulence** – **k-Epsilon** (рис. 1.17, б) → **Next** →.

7а. Задание граничных условий

Default Domain Default (ПКМ. Рис. 1.18) → **Delete Boundary** (Удаляется информация, которая размещалась программой «по умолчанию») →

– → **Boundaries** (ПКМ в окне **Boundary Definition** слева) → **Add Boundary...** → Ввести имя **INLET** в окно **New Boundary** → **OK** →

→ **Вкладка Boundary Definition**. Задать значения:

Boundary Type – **Inlet**; **Location** – выделить поверхности входного отверстия **F27.4** и **F19.4** → **OK**; **Flow Specification** – **Normal Speed**; **Normal Speed** – **20 m s⁻¹**; **Static Temperature** – **1500 C**. Вид вкладки аналогичен рис. 1.19.

– → **Boundaries** (ПКМ) → **Add Boundary...** → Ввести имя **OUTLET** → **OK** → **Вкладка Boundary Definition**. Задать значения:

Boundary Type – **Outlet**; Location – выделить поверхность выходного отверстия **F8.4** → **OK**; Flow Specification – **Average Static Pressure**; Relative Pressure – **0 [Pa]**. Заполнение позиций вкладки аналогично рис. 1.20.

– → **Boundaries** (ПКМ) → **Add Boundary...** → Ввести имя **WALL** → **OK** → **Вкладка Boundary Definition**. Задать значения:

Boundary Type – **Wall**; Location – выделить все поверхности региона Wall (**F7.4, F5.4, F11.4, F16.4**) → **OK**; Wall Influence On Flow – **No Slip Wall**. Вид вкладки аналогичен виду, показанному на рис. 1.21. → **Next**.

76. Переход в основной режим

Ввести **Enter General Mode** (На вкладке Final Operations) → **Finish** (ЛКМ слева внизу). Текущее изображение на экране аналогично изображению на рис. 1.22.

7в. Проверка данных расчета и закрытие препроцессора

Перед запуском вычислений исходные данные расчета должны проверяться. Делать это удобно после двойного щелчка ЛКМ по имени региона в разделе Default Domain вкладки Outline. При этом появляются соответствующие вкладки с граничными условиями.



→ **Сохранить** → **Заккрыть** (ЛКМ вверху справа).

В графическом окне появится схема проекта без знака вопроса в строке **Setup**.

8. Запуск решения

→ **Solution** (2 ЛКМ по ячейке схемы проекта) → **Start Run** в появившемся диалоговом окне Define Run.

При контрольном расчете процесс вычислений прервался досрочно. После этого на стартовой вкладке решателя Define Run была поставлена птица в окне Double Precision. Повторный расчет завершился успешно.

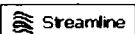
9. Просмотр результатов в постпроцессоре

Вид экрана после выхода в постпроцессор показан на рис. 1.26.

– **Построение линий тока газов в камере.**



→ **Streamline**



(или нажать  в главном меню) → **Ввести имя объекта** (или согласиться с именем, предложенным программой) →.

На вкладке Detail of Streamline ввести:

– в разделе Geometry параметры, показанные на рис. 1.27, *a*;

– в разделе Colour параметры, показанные на рис. 1.27, *б* → **Apply**.

Результаты расчета линий тока газов в пакете ANSYS 14 показаны на рис. 1.47.

В разделе 1.4.2 описаны процедуры получения поля температуры в объеме камеры и поля скорости среды в среднем продольном сечении камеры.

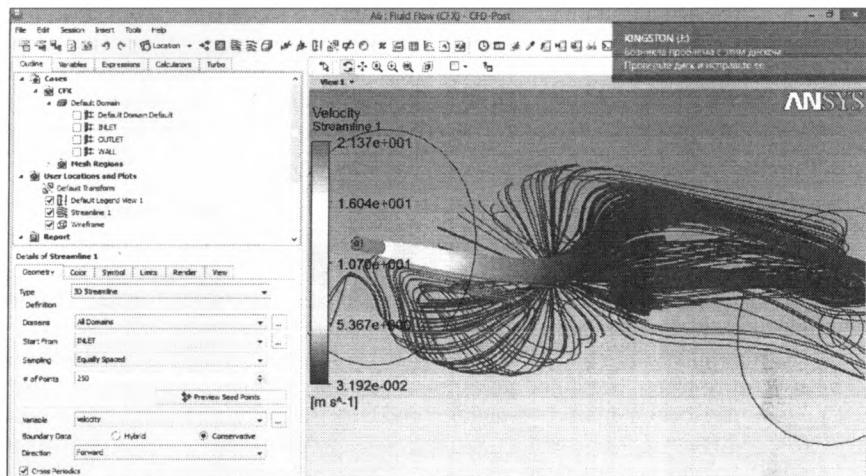


Рис. 1.47. Распределение линий тока газов в камере, полученное расчетом в ANSYS 14

Глава 2

ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ В ANSYS Multiphysics

ANSYS Multiphysics – это мощная многоцелевая система конечно-элементного анализа для широкого круга инженерных дисциплин. Кроме задач распространения тепла и задач механики жидкостей и газов, она используется для расчетных исследований прочности, электромагнетизма, оптимизации, решения связанных задач.

Применение пакета для решения теплофизических задач не имеет систематического и удобного для использования русскоязычного описания. Поэтому разработан и подробно описан учебно-справочный комплект примеров решения наиболее распространенных и важных теплофизических задач [1].

Материалы раздела дополняют работу [1]. Они содержат разработанный комплект типовых решений задач термической прочности для использования при компьютерном проектировании тепловых устройств. В комплекте задачи ANSYS Multiphysics решаются в интерфейсе программного комплекса, что очень удобно при решении отдельных и сравнительно небольших задач.

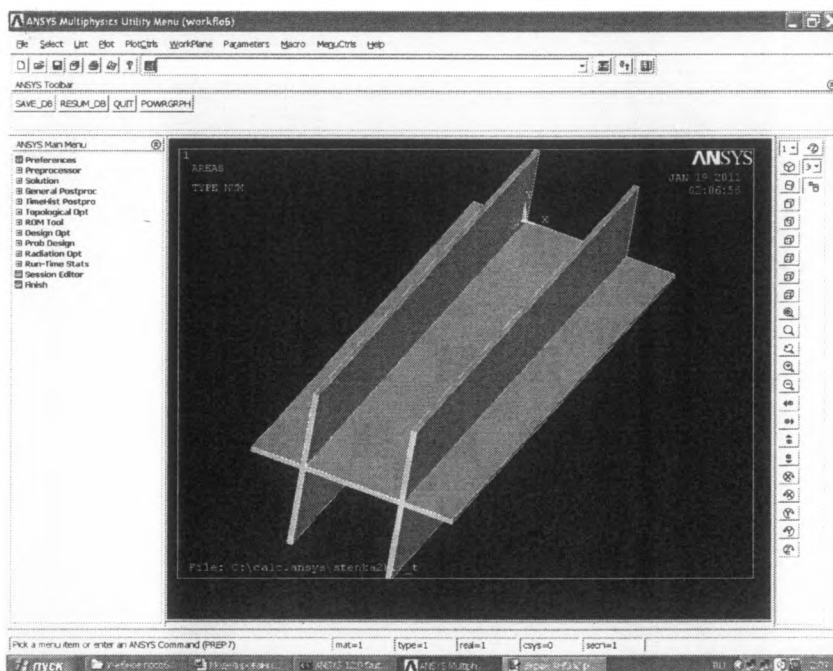


Рис. 2.1. Интерфейс программы ANSYS Multiphysics

2.1. Интерфейс пользователя

Управление программой ANSYS Multiphysics производится с помощью системы меню, называемой графическим интерфейсом пользователя (Graphical User Interface – GUI). Графический интерфейс, показанный на рис. 2.1, включает: меню утилит (Utility Menu); главное меню (Main Menu); графическое окно; стандартную панель; окно ввода команд; панель инструментов; панель управления видами; дополнительную панель; строку состояния (внизу экрана).

Графическое окно – область, в которой отображаются графические объекты. Это самое большое окно на экране.

Меню утилит, показанное на рис. 2.2, содержит пункты:

File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help

Рис. 2.2. Меню утилит

File – работа с файлами и базами данных (сохранение, чтение, очистка, импорт и экспорт моделей, выход из программы);

Select – вызов и создание компонентов модели;

List – функции использования набора объектов и создания компонентов;

Plot – вывод на экран элементов модели (линий, поверхностей, объемов и т. п.);

PlotCtrls – команды, управляющие графическим выводом;

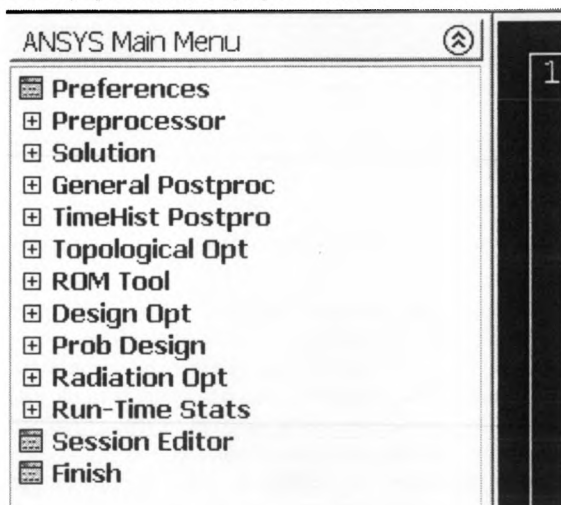


Рис. 2.3. Главное меню

WorkPlane – создание и управление положением рабочей плоскости;

Parameters – команды для работы с параметрами модели;

Macro – команды для создания макросов;

MenuCtrls – вызов и закрытие различных окон системы;

Help – вызов на экран справочной информации о системе.

Главное меню, показанное на рис. 2.3, управляет работой препроцессора, решателя и постпроцессора. Имеет древовидную структуру, в которой щелчок по знаку «+» в названиях разделов меню вызывает опции этих разделов. Для перехода к выполнению операций следующего раздела необходимо закончить выполнение операций предыдущего раздела.

Меню в том числе содержит следующие пункты:

Preferences – определяется структура главного меню в зависимости от типа решаемой задачи;

Preprocessor – открывает меню, содержащее команды препроцессора;

Solution – открывает меню команд настройки и выполнения решения;

General Postproc – содержит команды, отвечающие за вывод на экран результатов расчета;

TimeHist Postpro – содержит команды, отвечающие за вывод на экран результатов расчета многошаговых задач;

Design Opt – осуществляет вход и содержит функции модуля оптимизации модели;

Radiation Opt – содержит функции модуля определения коэффициентов излучения;

Finish – осуществляет выход из текущего модуля и переход на начальный уровень.

Окно ввода команд показано на средней части изображения рис. 2.4. Позволяет вводить текстовые команды и ответы на запросы системы.



Рис. 2.4. Стандартная панель, окно ввода команд и дополнительная панель

Окно вывода сообщений комплекса обычно расположено позади остальных средств GUI, но может быть перемещено на передний план. Содержит информацию комплекса: сообщения, предупреждения, ошибки, отклики команд.

Панель управления видами позволяет изменять расположение, размеры, способ изображения геометрической модели. Символика на кнопках модели делает интуитивно понятным их назначение.

Подробное описание интерфейса содержится в М. А. Денисова «Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование» [1].

2.2. Этапы решения задач

Действия до начала решения задачи

Для расчетов в ANSYS должна быть заранее создана рабочая директория, путь к которой содержит только латинские символы.

Например, можно создать директорию: **C:\calc.ansys**. Если геометрическая модель создана в другой программе, то файл с импортируемой геометрической моделью объекта должен быть помещен в папку **calc.ansys**. Например, в одном из расчетов работы в программе «КОМПАС-3D» была построена геометрическая модель теплопередающей стенки рекуператора и сохранена в формате Parasolid в файле **stenka1k.x_t**, затем файл поместили в папку **calc.ansys**.

Начало работы

Первый запуск задачи удобно проводить в приложении **Product Launcher** (англ. *Launcher* – пусковое устройство). Выполнить:

ПУСК → Все программы → ANSYS 12.0 → Mechanical APDL Product Launcher →

Появится окно **Product Launcher** с открытой закладкой **File Management**. В текстовое поле закладки ввести имя рабочей папки (**Working Directory**). В данном случае это **C:\calc.ansys**. В поле **Job Name** ввести имя задачи (модели). Допустим, это имя **work25**. Если нужно обратиться к задаче, решавшейся ранее, то ее имя должно быть выбрано из списка, появляющегося после нажатия кнопки **Browse**.

Рассмотренные выше примеры не требуют перехода к закладке **Customization/Preferences** для ввода информации, поэтому следует нажать кнопку **Run** внизу. При необходимости можно получить дополнительную информацию в разделе **Help**.

Настройка графического интерфейса

В главном меню (на экране слева) выбрать пункт **Preferences**. В появившемся окне выбрать инженерную дисциплину **Thermal** – тепловая задача, нажать кнопку **OK**. В сокращенной записи последовательность действий **MAIN MENU → PREFERENCES → THERMAL → OK**.

Примечание. При ином выборе настроек структура меню задачи перестраивается для решения одной из следующих задач:

Structural – конструкционный анализ, **ANSYS Fluid** – анализ течения жидкостей кодом **ANSYS, FLOTRAN CFD** – анализ течения жидкостей кодом **FLOTRAN CFD** и др.

Построение геометрической модели объекта

В программе **ANSYS Multiphysics** можно использовать три разных способа построения геометрической модели: импорт модели, предварительно построенной другой программой; твердотельное моделирование и непосредственное создание модели в интерактивном режиме работы с

программой. Построение модели выполняет собственный специализированный модуль геометрического моделирования.

В специализированном модуле имеется обычный набор таких булевых операций, как сложение, вычитание, пересечение, деление, склеивание и объединение. Формы могут создаваться из геометрических примитивов (сферы, призмы и т. д.). Из примитивов программа автоматически находит связанные с ними поверхности, линии и ключевые точки. Такое построение тел широко распространено в CAD-пакетах, и для простых геометрий особенности пакета быстро усваиваются на интуитивном уровне. Однако сложные геометрические построения требуют продолжительного освоения деталей, что целесообразно только для профессиональных пользователей пакета.

Специалистам, которые работают в ANSYS эпизодически, удобно использовать модуль программы построения твердотельных моделей тел только простой формы. Модели сложных геометрических объектов лучше строить в универсальном и привычном пользователю CAD-пакете («КОМПАС-3D» и др.). Тогда не придется запоминать множество второстепенных особенностей каждого из пакетов, использованных в ANSYS. Способы улучшения модели за счет удаления отверстий, полостей и выпуклостей, исключения мелких подробностей, устранения ненужных зазоров, перекрытий или взаимных внедрений частей объекта при таком подходе не меняются.

Импорт геометрических моделей удобно рассмотреть на примере. Исходная геометрическая модель подготовлена в программе «КОМПАС-3D» и сохранена в формате **ParaSolid**. Файл с импортируемой геометрической моделью объекта *stenka1k.x_t* помещен в предварительно созданную директорию (папку) **C:\calc.ansys**.

Выполнить действия:

UTILITY MENU → FILE → Import → PARA...

В меню «ANSYS Connection for Parasolid» (рис. 2.5) в окне «Drives» выбрать диск **C**; в окне «Directories» выбрать **C:\calc.ansys**; в окне «File Name» выбрать *stenka1k.x_t* → **Клик** → (имя файла перешло вверх). В окне «Geometry Type» выбрать **Solids Only** → **OK**.

В графическом окне появится модель в виде каркаса (рис. 2.6, а). Для перехода к полутоновому отображению выполнить:

UTILITY MENU → PLOTCTRLS → STYLE → SOLID Model Facets.

В меню «SOLID Model Facets» вместо стиля «Wireframe» установить **Normal Faceting** → **OK**.

Обновить изображение **UTILITY MENU → PLOT → Replot**. Полученное изображение показано на рис. 2.6, б.

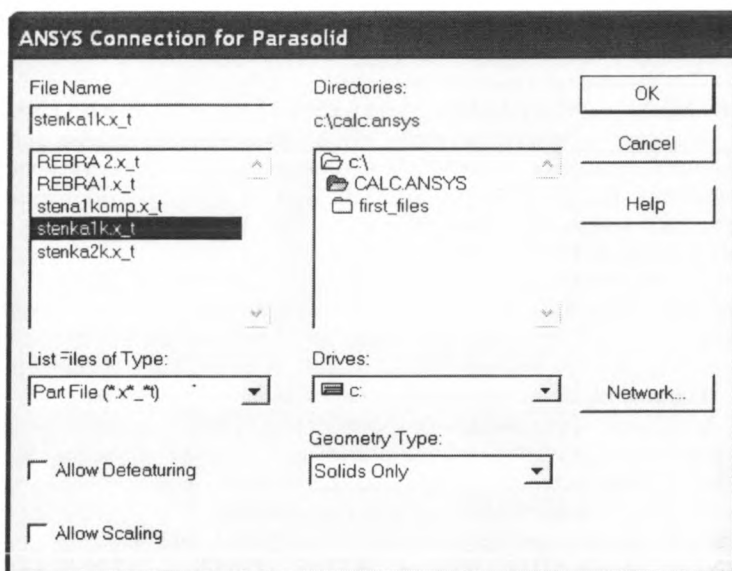


Рис. 2.5. Меню для импорта геометрической модели

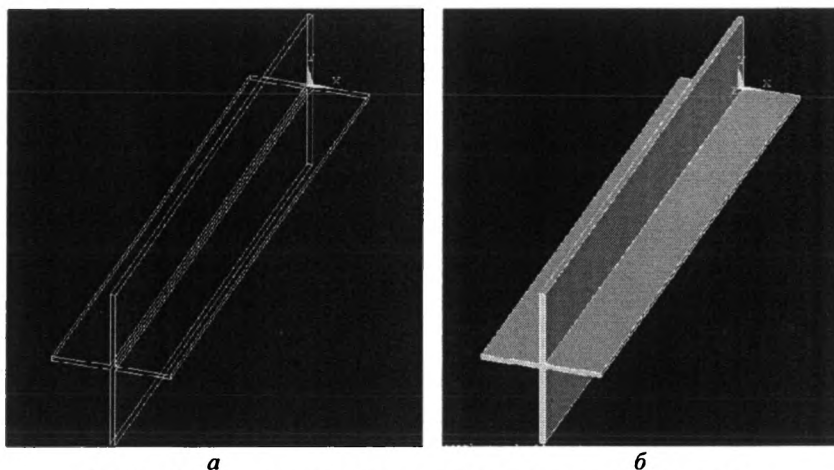


Рис. 2.6. Изменение вида геометрической модели в процессе ее импорта:
а – каркасная модель; б – полутонное изображение

Выбор типа анализа и задание нагрузок

Для выбора типа анализа выполнить

MAIN MENU → SOLUTION → ANALYSIS TYPE → NEW ANALYSIS →.

Тип анализа выбирается в меню «New Analysis». В задачах теплофизики используются позиции «Steady-State» – стационарный процесс (используется по умолчанию) и «Transient» – нестационарный процесс. Допустим, выбран нестационарный анализ **TRANSIENT → OK**. После этого в меню **Transient Analysis** выбрать **FULL → OK**.

В стационарном тепловом анализе нагрузками обычно называют граничные условия задачи. Подробно они рассмотрены в предыдущем разделе работы.

Задание нагрузок при анализе нестационарного процесса

В задачах нестационарного теплообмена должны задаваться временные условия однозначности. Обычно начальные условия процесса задают как начальное распределение температуры. Для этого:

1) может быть задана общая начальная температура.

Например, при решении одной из задач выполнялись действия:

MAIN MENU → SOLUTION → DEFINE LOADS → APPLY → INITIAL CONDITION → DEFINE →. Затем в появившемся меню необходимо выбрать **Pick All →** В появившемся следующем меню выбрать **Lab = TEMP**, задать **Value = 25 → OK** (начальная температура всего тела задана равной 25 °C);

2) можно задавать начальные температуры или по узлам, или по группам узлов и тем самым задавать любое распределение;

3) можно задавать начальное распределение температуры в нестационарной задаче, полученное из стационарного решения.

Задание опций решения задач нестационарного теплообмена рассмотрено в примерах. Здесь следует отметить разницу между терминами шаг нагружения и шаг решения. **Шаг нагружения** – это та конфигурация нагрузок, для которой получено решение. Например, к конструкции можно приложить ветровую нагрузку на первом шаге нагружения, а на втором – гравитационную нагрузку. При нестационарном анализе полную последовательность нагрузок часто разбивают на несколько шагов нагружения. **Шаг решения** – это изменение шага расчета внутри шага нагружения; используется главным образом при нестационарном и нелинейном анализе для улучшения точности и сходимости.

Получение решения и обработка результатов

По команде **SOLVE** программа обращается за информацией о модели и нагрузках к базе данных и выполняет вычисления. Результаты записываются в специальный файл и в базу данных. При этом в базе данных может храниться только один набор результатов, тогда как в файл могут быть записаны результаты для всех шагов решения.

Опции шага нагружения используются для организации массивов выходных величин, управления сходимостью решения и обычного определения нагрузок на

шаге нагружения. Так, например, пользователь может задать число дополнительных более мелких шагов в пределах одного шага нагружения или указать, должна ли нагрузка меняться плавно на данном шаге нагружения.

Решение уравнений, определяющих процесс, с граничными и начальными условиями – самая продолжительная стадия анализа, но вмешательства пользователя она не требует.

Просмотр результатов решения

Препроцессор выполняет графическое и табличное представление результатов. Результаты, записанные в базу данных на стадии решения, выводятся на экран или распечатываются на принтере. Возможно отображение результатов в плоскостях, пересекающих модель.

Процессор общего назначения может преобразовывать массивы результатов, сортировать, комбинировать, создавать на их основе листинги или графические изображения.

Табличные результаты – листинги – удобны для помещения их в отчеты, презентации и т.д. Им можно придавать удобную форму, сортировать. Наглядными могут быть данные, представленные в графической форме. Можно выводить области равных значений в виде изолиний, цветных полос, изоповерхностей. Могут строиться профили результатов, линии тока. Профиль результатов – это график, который показывает изменение расчетной величины на заданном пользователем пути. Линии тока показывают траектории движения частиц в движущемся потоке.

К данным на профиле результатов могут применяться математические операции (интегрирование, дифференцирование, умножение, скалярное и векторное произведение). Математическую обработку можно проводить для информации из таблиц конечных элементов. Результаты решения можно занести в таблицу элемента и использовать ее для выполнения арифметических операций над содержимым колонок таблицы. К наиболее распространенным операциям относятся сложение, умножение, деление, использование экспоненциальной зависимости и вычисление коэффициента запаса. Большинство операций с результатами выполняют для одного (например, последнего) шага решения.

Часто необходимо оценить расчетную погрешность результатов, обусловленную сеточной дискретизацией. Для этого постпроцессор отслеживает параметр сохранения энергии, вычисляемый для каждого элемента. Результаты анализа позволяют выделять участки сетки, которые нуждаются в измельчении.

Постпроцессор истории нагружения (для результатов, зависящих от времени) дает возможность представить результаты расчета в виде зависимостей от времени или шагов нагружения. Эти результаты доступны для обозрения в графической или табличной форме.

Над функциональными зависимостями в постпроцессоре могут выполняться алгебраические преобразования. Новые кривые можно получать как результат операций сложения, вычитания, умножения и деления. Доступны и такие процедуры, как получение абсолютной величины, извлечение корня квадратного, нахождение логарифмов и экспонент, максимума и минимума.

Значения скорости и ускорения можно получать как результат операций дифференцирования и интегрирования расчетных зависимостей.

Работа с постпроцессорами рассмотрена в примерах раздела 2.4.

2.3. Температурные напряжения при нагреве

Механические температурные напряжения возникают в твердых телах при неравномерном распределении температуры, определяющем неравномерность теплового расширения частей тела. В сплошном материале взаимное перемещение объемов, компенсирующее неравномерное расширение, ограничено. Нередко конструктивно ограничена возможность теплового расширения всего тела как целого. Соответственно, в телах появляются большие зоны с напряжениями растяжения или сжатия. Действие напряжений сопровождается деформациями тела, часто создающими проблемы для производственного процесса. Например, при быстром нагреве в металле могут появляться внутренние трещины; при несимметричном сверху и снизу нагреве заготовок в печах их может изгибать (коstrить), что затрудняет транспортировку металла по печи; металлоконструкции ограждений агрегатов искривляются и ремонты приходится проводить чаще.

Схематично результат деформации показан на рис. 2.7, а. Стержень с поперечным сечением S растягивается с двух сторон силой F . Соответственно, напряжение при растяжении $\sigma = F/S$ [Н/м²]. Длина стержня l_0 увеличивается на величину Δl . Деформация при растяжении $\epsilon = \Delta l/l_0$. Зависимость напряжения от деформации для металлических стержней показана на диаграмме растяжения рис. 2.7, б. На участке кривой OA материал подчиняется закону, устанавливающему пропорциональность деформации и напряжения. Зависимость называется законом Гука, который выражается формулой $\sigma = E\epsilon$, где E – модуль упругости (модуль Юнга), характеризующий способность материала сопротивляться деформации.

Напряжение, соответствующее точке B , называют пределом упругости $\sigma_{упр}$. Значение $\sigma_{упр}$ часто принимают в качестве предельного напряжения при расчетах. При дальнейшем нагружении материала деформация становится пластической, появляется состояние текучести материала, при котором деформация растет при малом увеличении нагрузки. Точка C является пределом текучести (σ_T). После этой точки удлинение не требует больших усилий, в точке E на стержне образуется местное сужение – «шейка», и образец разрывается. Важной характеристикой является предел прочности σ_B или временное сопротивление (напряжение), вызванное наибольшей нагрузкой, то есть напряжение в образце в момент разрыва. В практических прочностных расчетах используется величина $[\sigma]$ – допускаемое напряжение, которое меньше предельно опасных напряжений в число раз, определяемое нормативным коэффициентом запаса прочности. Обычно допускаемые напряжения выбирают по справочным таблицам.

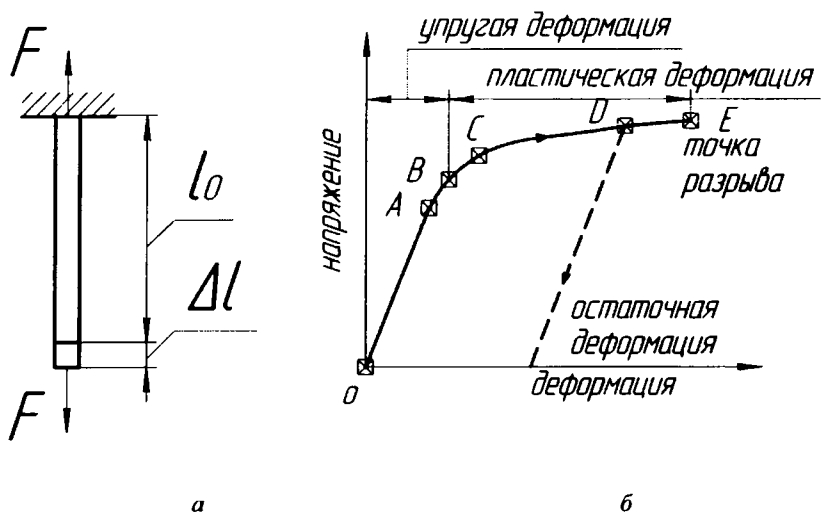


Рис. 2.7. Уруго-пластическая деформация стержня:
а – схема приложения нагрузки; б – диаграмма растяжения стержня

При деформации могут изменяться не только продольные, но и поперечные размеры стержня. При растяжении ширина стержня уменьшается на Δb и относительная поперечная деформация $\epsilon_1 = \Delta b / b$. Соотношение деформаций поперечной и продольной называют коэффициентом Пуассона и обозначают $\mu = \epsilon_1 / \epsilon$. Для стали μ меняется в пределах 0,25–0,33.

Напряжения считаются положительными, если в выбранном направлении происходит растяжение, и отрицательными – если сжатие. В процессе нагрева пластины вблизи поверхности появляются сжимающие (отрицательные) напряжения, а в середине – растягивающие (положительные). Абсолютная величина напряжений пропорциональна коэффициенту расширения материала, модулю упругости и температурному перепаду [2]. Напряжения растут с ростом толщины пластины и уменьшением температуропроводности. Металл разрушается, когда напряжения достигают предела прочности. При этом наиболее опасны растягивающие напряжения.

Температурные напряжения должны учитываться в интервале температуры до возникновения в материале пластических свойств (у стали это интервал 0–500 °С). При более высокой температуре напряжения исчезают из-за пластической деформации. Пластичность малоуглеродистой стали высока, и напряжения ей не опасны при температуре ниже 500 °С.

Расчеты температурных напряжений должны проводиться при заданных в математической модели свойствах материала. Для примера приведены значимые для данной задачи свойства среднеуглеродистой стали при температуре 300 °С: теплопроводность – $\lambda = 45,6$ Вт/(м град); теплоемкость –

$c = 0,523 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$; плотность – $\rho = 7,767 \text{ г/см}^3$; температуропроводность – $a = 0,038 \text{ м}^2/\text{ч}$; предел прочности при растяжении – $\sigma_B = 650 \text{ МПа}$; предел текучести при растяжении – $\sigma_T = 279 \text{ МПа}$; модуль упругости – $E = 200\,000 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона – $\mu = 0,28$; коэффициент линейного расширения – $\beta = 13 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Приближенная оценка сжимающих (растягивающих) напряжений при равномерном нагреве (охлаждении) может выполняться по формуле

$$\sigma = E\beta\Delta t,$$

где β – коэффициент линейного температурного расширения, $1/\text{K}$; Δt – перепад температуры по толщине пластины, $^\circ\text{C}$ [3].

Для оценочных расчетов используется несколько иная зависимость

$$\sigma = \frac{\beta E}{1-\mu} \frac{C_H S^2}{3a} = \frac{\beta E}{1-\mu} \frac{2}{3} \Delta T = 0,95\beta E \Delta T \text{ Н/м}^2,$$

где μ – коэффициент Пуассона (для стали принято $\mu = 0,3$);

C_H – скорость нагрева, K/ч ; S – толщина пластины, м ; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{ч}$ [4].

2.4. Решение задач термпрочностного анализа

Часто в промышленных объектах одновременно протекают разные процессы: в индукционных печах под действием переменного электромагнитного поля появляются вихревые токи, выделяется тепло в металле, возникают поля температуры, переносится тепло, и все это одновременно. В нагреваемом металле неравномерная температура порождает неравномерность теплового расширения материала и появление механических напряжений. Целый ряд процессов одновременно протекает в потоке горящего газа, текущем в камерах тепловых агрегатов и т. д. Соответственно появляется необходимость в одновременном проведении разных видов численного анализа.

В ANSYS Multiphysics используется два вида связывания разных полей.

При «параллельном» (одновременном) анализе используются соответствующие конечные элементы, имеющие необходимые степени свободы (алгоритмы численного анализа переменных), учитывающие связи между элементами, относящимися к разным видам анализа.

При «последовательном» анализе выполняются два, следующих друг за другом, разных вида анализа. Обе части анализа связываются использованием результатов первого анализа в качестве нагрузок для второго. Ниже рассматривается пример выполнения последовательного термпрочностного анализа, в котором первый этап – тепловой расчет узловых температур, второй этап – прочностной расчет, использующий температурные нагрузки, определенные на первом этапе.

Последовательный анализ часто более удобен для применения, так как облегчает понимание причин получения тех или иных эффектов, ускоряет тестирование разрабатываемых программ. Но метод применим только когда

связываемые «степени свободы» слабо влияют друг на друга. В случаях, когда взаимовлияние параметров велико, предпочтительно использование «параллельного» анализа.

2.4.1. Температурные напряжения при стационарном теплообмене в металле. Пример параллельного сопряженного анализа

Постановка задачи

Металлическая заготовка с размерами $0,1 \times 0,15 \times 0,2$ м имеет температуру сверху и на двух соседних боковых поверхностях – 400°C ; две противоположные боковые поверхности – адиабатические; на нижней поверхности – 100°C . Определить распределения температуры и напряжений в заготовке, используя одновременно трехмерный стационарный тепловой анализ и анализ напряженно-деформированного состояния. Теплопроводность материала пластины $\lambda = 32,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; плотность $\rho = 7610 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Порядок решения

1. Строится прямоугольник боковой поверхности заготовки

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MODELING → CREATE → AREAS → RECTANGLE → BY 2 CORNERS → X = 0, Y = 0, Width = 0.15, Height = 0.1.

2. Объемная модель заготовки получается выдавливанием плоскости на расстояние 0,2 м

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MODELING → OPERATE → EXTRUDE → AREAS → ALONG NORMAL.

Щелчком в поле прямоугольника выделить выдавливаемую поверхность → **OK**. В меню ввести номер поверхности NAREA = 1; глубина выдавливания «Length of extrusion» – **0.2** → **OK**. В правой части графического окна нажать кнопку «Isometric View». Полученная модель заготовки показана на рис. 2.8.

3. Задаются свойства материала

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MATERIAL PROPS → MATERIAL MODELS →

Появляется меню определения свойств материала.

→ **STRUCTURAL → Linear → Elastic → Isotropic**

Ввести EX = **2E11**; PRXY = **0.28** → **OK**.

→ **STRUCTURAL → DENSITY**

Ввести DENS = **7610** → **OK**.

→ **STRUCTURAL → THERMAL EXPANSION → Secant Coefficient → Isotropic** Ввести ALPX = **13E-6** → **OK**.

=> **THERMAL => CONDUCTIVITY => ISOTROPIC**

Ввести KXX = **32.7** → **OK**.

→ **Material → Exit**.

4. Выбор типа конечного элемента

MAIN MENU → **PREPROCESSOR** → **ELEMENT TYPE** → **Add/Edit/Delete** → **Add...** → В меню выбрать слева **Coupled Field**, справа **Scalar Tet 98** (тетраэдр) → **OK**.

В меню «Element Types» определился тип элемента «SOLID 98». Этот элемент позволяет одновременно моделировать разные физические процессы → **CLOSE**.

5. Построение конечно-элементной модели

MAIN MENU → **PREPROCESSOR** → **MESHING** → **MESH TOOL** →

В меню «Mesh Tool» в опции «Global» нажать кнопку **Set**. В появившемся меню задать **SIZE = 0.02** → **OK**.

→ **MESH** (в нижней части меню) → Щелчок по объекту в графическом окне, выделяющий его, → **PICK ALL**.

В графическом окне появился объект с конечно-элементной сеткой (рис. 2.9).

6. Сохранение промежуточных результатов работы

UTILITY MENU → **FILE** → **Save as Jobname**

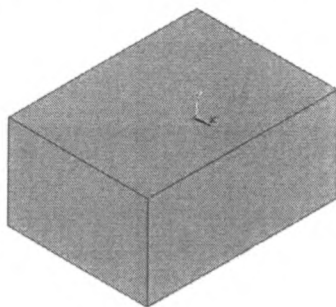


Рис. 2.8. Модель заготовки

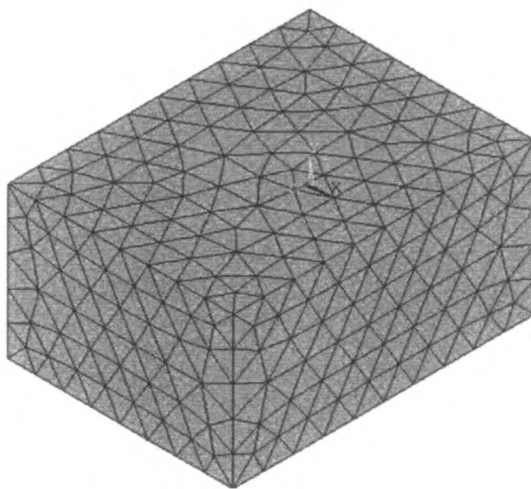


Рис. 2.9. Заготовка с конечно-элементной сеткой

7. Задание граничных условий

– На верхней и двух боковых поверхностях задается постоянная температура 400 °C.

MAIN MENU → SOLUTION → DEFINE LOADS → APPLY → THERMAL → TEMPERATURE → On Areas.

Появится меню «Apply TEMP on Areas». В графическом окне щелчком по середине (центру тяжести) поверхности выделить последовательно три плоскости: верхнюю и две соседние боковые (при ошибках нажатием правой кнопки мыши сменить курсор-стрелку ↑ и повторным щелчком снять неправильное выделение) → **OK**.

Появится новое меню «Apply TEMP on Areas». В окне выделить надпись **TEMP**, в окне **VALUE** задать **400** → **OK**.

Аналогично задать температуру нижней поверхности равную 100 °C.

На двух боковых поверхностях (температура которых не задавалась) автоматически заданы адиабатические условия.

– Ограничиваются перемещения объекта (задаются кинематические граничные условия). Для этого задаются нулевые перемещения каких-либо трех взаимно перпендикулярных плоскостей. У каждой из плоскостей ограничивают перемещения по оси, нормальной плоскости.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → LOADS → DEFINE LOADS → → APPLY → STRUCTURAL → Displacement → On Areas →.

Появляется меню «Apply U,ROT on Areas». Сначала мышью выбрана левая боковая поверхность заготовки → **OK**. Эта поверхность не должна перемещаться вдоль оси *OZ*. Соответственно в новом меню выбирается **UZ**. В поле «**VALUE**» ввести величину перемещения **0**. → **OK**.

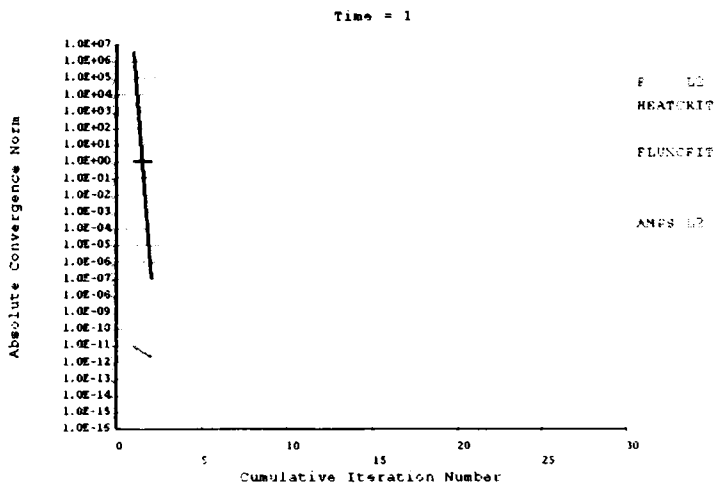


Рис. 2.10. График сходимости итерационного решения задачи

**MAIN MENU → PREPROCESSOR → LOADS → DEFINE LOADS →
→ APPLY → STRUCTURAL → Displacement → On Areas →.**

В меню выбрать правую боковую поверхность заготовки → **OK**.

Она не должна перемещаться вдоль оси *OX*. Выбрать **UX**. Задать «VALUE» = 0. → **OK**.

**MAIN MENU → PREPROCESSOR → LOADS → DEFINE LOADS →
→ APPLY → STRUCTURAL → Displacement → On Areas →.**

В меню выбрать верхнюю поверхность → **OK**.

Выбрать **UY**. Задать «VALUE» = 0. → **OK**.

8. Запускается решение задачи

MAIN MENU → SOLUTION → SOLVE → CURRENT LS → (Просмотр информации. **file → close**) → **OK**. Появляется и исчезает предупреждение «Nonlinear Solution», затем сообщение «Solution is done!»

→ **close**. О результатах вычислений сообщает рис. 2.10.

9. Просмотр и фиксация результатов расчета

– Изображение полей температуры в виде изолиний

**MAIN MENU → GENERAL POSTPROC → PLOT RESULTS → CONTOUR
PLOT → NODAL SOLU → DOF SOLUTION, Temperature TEMP → OK.**

Изображение показано на рис. 2.11.

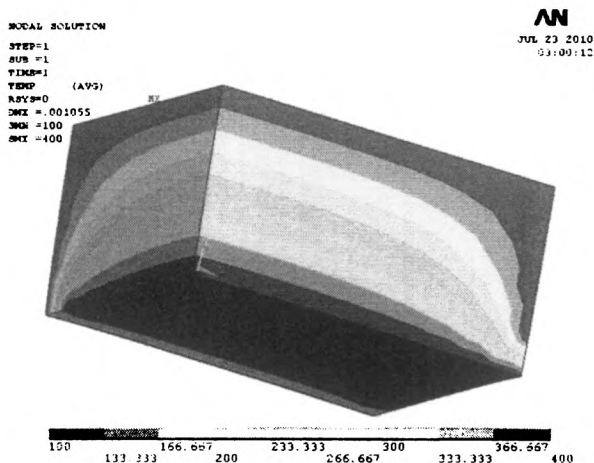


Рис. 2.11. Изолинии температуры металла

– Изображение полей напряжений в виде изолиний.

**MAIN MENU → GENERAL POSTPROC → PLOT RESULTS → CONTOUR
PLOT → NODAL SOLU → Stress → von Mises stress → OK.**

Изображение показано на рис. 2.12.

MODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SECV (AUG)
CMZ = .001055
SMZ = .799E+07
RMZ = .143E+10

AN
JUL 23 2010
03:03:11

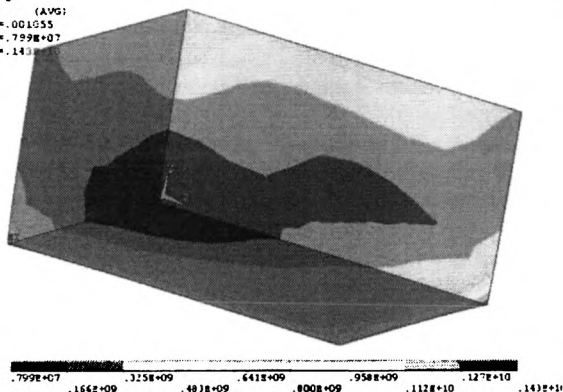


Рис. 2.12. Изолинии напряжений в заготовке

2.4.2. Температурные напряжения при нагреве металла. Параллельный сопряженный анализ

Постановка задачи

Металлическая заготовка с размерами и свойствами, соответствующими исходным данным предыдущего примера, нагревается по графику, показанному в таблице. Определить изменение во времени температуры и напряжений в заготовке, используя одновременно трехмерный стационарный тепловой анализ и анализ напряженно-деформированного состояния. Боковые поверхности адиабатические. Начальная температура – 20 °С.

Таблица 2.1

Режим нагрева заготовки				
Время от начала нагрева, с	300	600	1200	1800
Температура верхней поверхности, °С	300	700	950	1100
Температура нижней поверхности, °С	50	300	600	900

Порядок решения

Выполнить действия, описанные в пунктах 1–6 примера из параграфа 2.4.1.

1. Задание граничных условий. Для верхней поверхности
MAIN MENU → SOLUTION → DEFINE LOADS → APPLY → THERMAL → TEMPERATURE → On Areas.

Появилось новое меню «Apply TEMP on Areas». Задать Lab2 = TEMP; «Apply as» – NEW Table → OK. В новом меню: «Name of new table» – TEMPOVI → OK. Следующее меню: в таблице задать I, J, K = 4, 1, 1 → OK. Меню «Table Array» – заполнить таблицу в соответствии с таблицей из исходных данных (пояснения к заполнению таблицы делались в примерах решения задач нестационарного теплообмена).

Повторить действия пункта 7 примера из пункта 2.4.1, относящиеся к ограничению перемещений заготовки.

MAIN MENU → SOLUTION → LOAD STEP OPTS → TIME/FREQUENCY → Time-Time Step → В меню вводится: **TIME = 1800** (в верхнее окно вводится общее время нагрева пластины); **KBC = ramped**; **DELTIM = 60** (шаг по времени для расчета полей параметров); «Minimum time step size» = **30**; **AUTOTS = Prog Chosen** (шаг по времени выбирает ANSYS).

3. Запускается решение задачи.

Time = 1900

Absolute Convergence Norm

1.E-047
1.E-046
1.E-045
1.E-044
1.E-043
1.E-042
1.E-041
1.E-040
1.E-039
1.E-038
1.E-037
1.E-036
1.E-035
1.E-034
1.E-033
1.E-032
1.E-031
1.E-030
1.E-029
1.E-028
1.E-027
1.E-026
1.E-025
1.E-024
1.E-023
1.E-022
1.E-021
1.E-020
1.E-019
1.E-018
1.E-017
1.E-016
1.E-015
1.E-014

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Cumulative Iteration Number

HAATONIC
FLUORACIT
AMPY LV

→ **close.** Ход вычислительного процесса отображает рис. 2.13.

68

– Изображение в виде изолиний полей температуры в конце нагрева
**MAIN MENU → GENERAL POSTPROC → PLOT RESULTS → CONTOUR
 PLOT → NODAL SOLU → DOF SOLUTION, Temperature TEMP → OK.**
 Изображение показано на рис. 2.14.

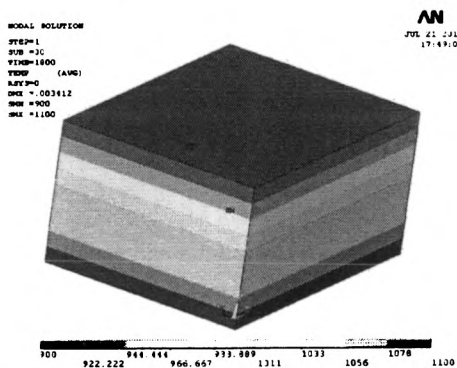


Рис. 2.14. Изолинии температуры в металле

– Изображение полей напряжений в виде изолиний в конце нагрева.
**MAIN MENU → GENERAL POSTPROC → PLOT RESULTS → CONTOUR
 PLOT → NODAL SOLU → Stress → von Mises stress → OK.**
 Изображение показано на рис. 2.15.

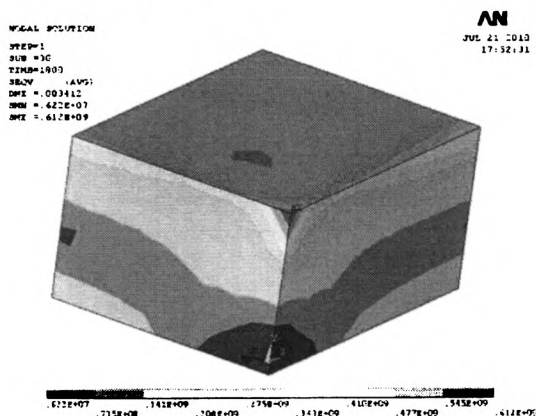


Рис. 2.15. Поля напряжений в заготовке

– Одновременное изображение деформированного и недеформированного состояния модели в конце нагрева.

MAIN MENU → GENERAL POSTPROC → PLOT RESULTS → Deformed Shape → Def + NODAL SOLU → OK.

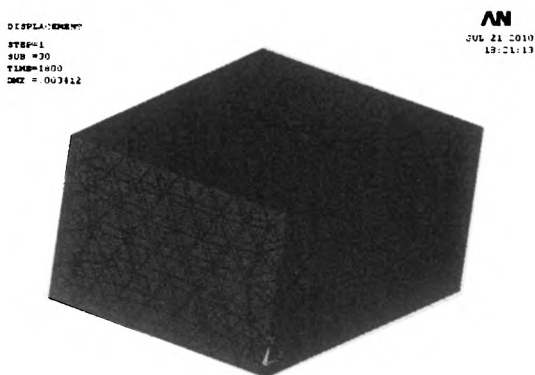


Рис. 2.16. Анализ процесса деформации

Полученное в результате изображение (рис. 2.16) указывает на деформацию из-за теплового расширения заготовки.

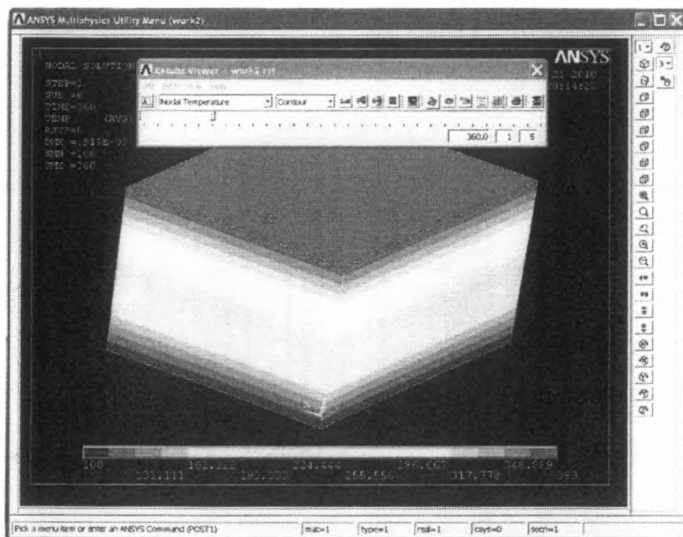


Рис. 2.17. Отображение изолиний во времени

– Способы отображения результатов расчета, меняющихся во времени, рассмотрены в примерах нестационарного теплообмена и в примере «Моделирование теплообмена при изменении толщины слоя окалины».

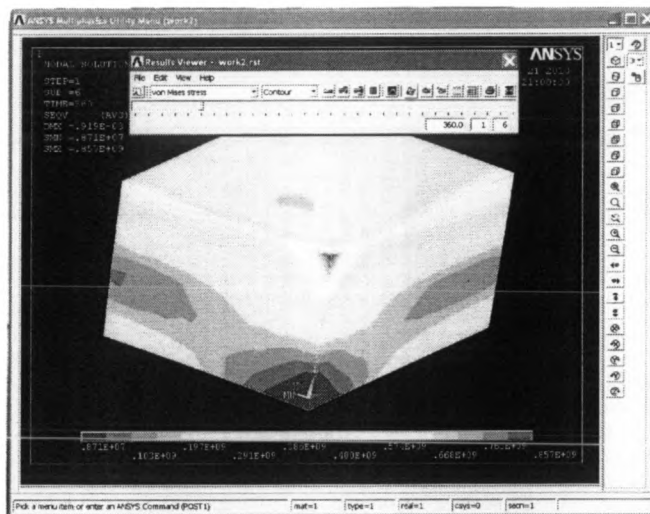


Рис. 2.18. Отображение напряжений во времени

– Возможности отображения результатов во времени показывает рис. 2.17, на котором показаны изолинии температуры в момент времени 360 с от начала нагрева. Рисунок получен командами

MAIN MENU → GENERAL POSTPROC → RESULTS VIEWER →

В меню выбрать окно «Choose a result item». Далее

NODAL SOLU → DOF SOLUTION → NODAL Temperature →

Передвинуть бегунок в положение, соответствующее выбранному времени (в данном случае 360 с). Щелчок по кнопке «Plot Results». Аналогично получено соответствующее выбранному времени изображение поля напряжений (рис. 2.18).

2.4.3. Последовательный сопряженный анализ стационарного теплообмена при определении температурных напряжений

Постановка задачи

Задачу, постановка которой описана в параграфе 2.4.1, решить, используя последовательный сопряженный анализ вместо параллельного.

Порядок решения

1. Выполнить действия, описанные в пунктах 1–3 параграфа 2.4.1.
2. Выбор типа конечного элемента

MAIN MENU → PREPROCESSOR → ELEMENT TYPE → Add/Edit/Delete → Add... → В меню выбрать слева **Thermal Mass Solid**, справа **Brick 8 node 70 → OK.**

В меню «Element Types» определен тип элемента «SOLID 70» → **CLOSE.**

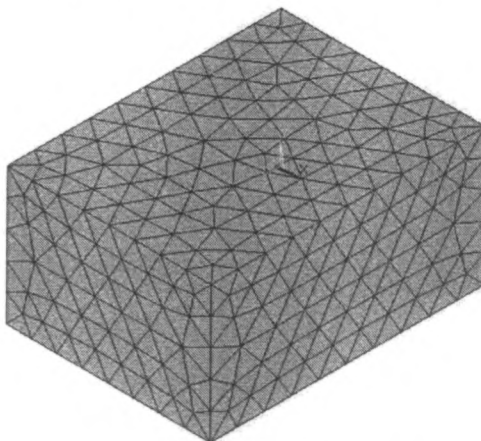


Рис. 2.19. Конечно-элементная сетка

3. *Выполнить действия, описанные в пунктах 5–6 параграфа 2.4.1.*

В результате получен объект с конечно-элементной сеткой (рис. 2.19).

Задание граничных условий.

На верхней и двух боковых поверхностях задается постоянная температура 400 °С.

MAIN MENU → SOLUTION → DEFINE LOADS → APPLY → THERMAL → TEMPERATURE → On Areas.

Появилось меню «Apply TEMP on Areas». В графическом окне щелчком по середине (центру тяжести) поверхности выделить последовательно три плоскости: верхнюю и две соседние боковые → **OK.**

Появилось новое меню «Apply TEMP on Areas». В окне выделить надпись **TEMP**, в окне **VALUE** задать **400 → OK.**

Аналогично задать температуру нижней поверхности равную 100 °С.

На двух боковых поверхностях (температура которых не задавалась) автоматически заданы адиабатические условия.

4. *Выполнить действия, описанные в пунктах 8–9 параграфа 2.4.1.*

Распределение температуры в заготовке показано на рис. 2.20.

MODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =1
TIME=1
TEMP (AVG)
R,SYS=0
SMN =100
SMX =400

AN

JUL 22 2010
20:12:39

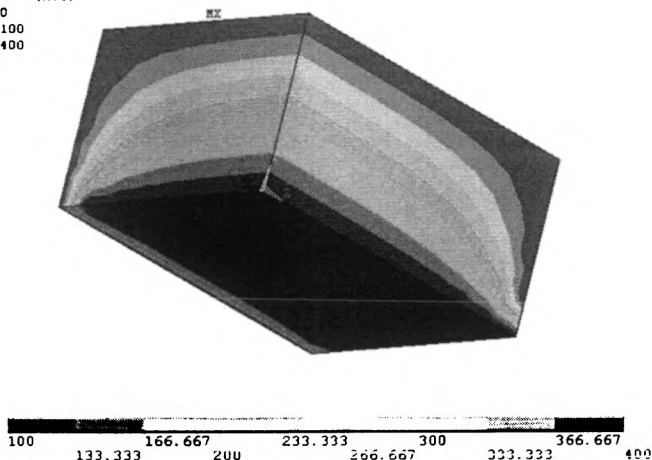


Рис. 2.20. Распределение температуры

5. Переход к выполнению прочностного анализа, выполняемого с использованием полей температуры, полученных при тепловом анализе.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → ELEMENT TYPE → SWITCH ELEM TYPE → THERMAL TO STRUC → OK.

6. **MAIN MENU → SOLUTION → DEFINE LOADS → APPLY → STRUCTURAL → TEMPERATURE → From Therm Analy.**

В меню «Apply TEMP from Thermal Analysis» нажать «Browse...» → в меню «Fname Name of results file» выбрать файл «work3.rth» → **открыть** → **OK** (work3 – здесь это рабочий файл, заданный при запуске расчета; *rth – расширение для данных результатов термического анализа).

Примечание. Построение конечно-элементной сетки может быть выполнено разными способами. Например, если после команд **MAIN MENU → PREPROCESSOR → MESHING → MESH TOOL →** в меню выполнить команды **Shape – Hex – Sweep – Sweep** (внизу) – **выделить тело** – **OK**, конечно-элементная сетка примет вид, показанный на рис. 2.21. С этой сеткой получено распределение температуры в заготовке, показанное на рис. 2.22, которое практически совпадает с распределением на рис. 2.20.

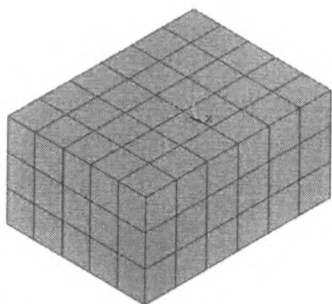


Рис. 2.21. Вариант конечно-элементной сетки

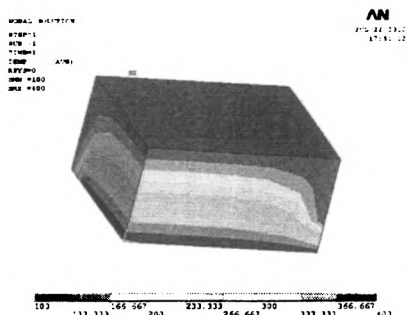


Рис. 2.22. Распределение температуры

7. MAIN MENU → PREPROCESSOR → LOADS → DEFINE LOADS → APPLY → STRUCTURAL → Displacement → On Areas →.

Появляется меню «Apply U,ROT on Areas». Сначала мышью выбрана левая боковая поверхность заготовки → **OK**. Эта поверхность не должна перемещаться вдоль оси *OZ*. Соответственно в новом меню выбирается **UZ**. В поле «VALUE» ввести величину перемещения **0**. → **OK**.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → LOADS → DEFINE LOADS → → APPLY → STRUCTURAL → Displacement → On Areas →.

В меню выбрать правую боковую поверхность заготовки → **OK**. Она не должна перемещаться вдоль оси *OX*. Выбрать **UX**. Задать «VALUE» = **0**. → **OK**.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → LOADS → DEFINE LOADS → → APPLY → STRUCTURAL → Displacement → On Areas →.

В меню выбрать верхнюю поверхность → **OK**.

Выбрать **UY**. Задать «VALUE» = **0**. → **OK**.

8. Производится расчет

MAIN MENU → SOLUTION → SOLVE → CURRENT LS → (Просмотр информации. **file → close**) → **OK**.

9. Просмотр результатов расчета напряжений в виде изолиний

MAIN MENU → GENERAL POSTPROC → PLOT RESULTS → CONTOUR PLOT → NODAL SOLU → Stress → von Mises stress → OK.

Изображение показано на рис. 2.23.

MODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 SHOW (AVG)
 DOK = .001154
 SOK = .2778+09
 SKX = .9188+09

AN
 JUL 22 2010
 21:36:24

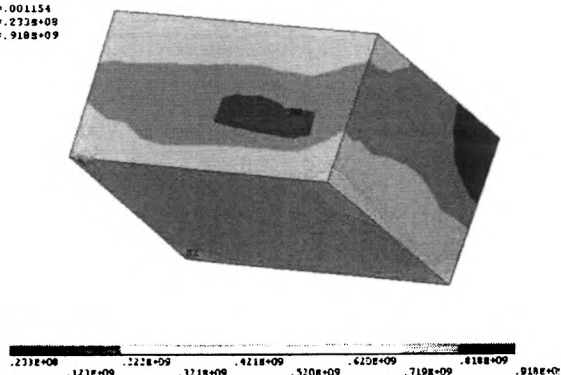


Рис. 2.23. Изолинии напряжений

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Денисов М. А.* Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование : учеб. пособие / М. А. Денисов. Екатеринбург : УрФУ, 2011. 149 с.
2. *Тайц Н. Ю.* Технология нагрева стали / Н. Ю. Тайц. М. : Metallurgizdat, 1950. 450 с.
3. *Рудницын М. Н.* Справочное пособие по сопротивлению материалов / М. Н. Рудницын, П. Я. Артемов, М. И. Любошиц. Минск : Гос. издат. БССР, 1961. 516 с.
4. *Кривандин В. А.* Теория, конструкции и расчеты металлургических печей / В. А. Кривандин, Ю. П. Филимонов. Т. I : Теория и конструкции металлургических печей. М. : Металлургия, 1978. 360 с.

Учебное издание

Денисов Михаил Александрович

**КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ.
ANSYS**

Корректор *Е. Е. Крамаревская*
Компьютерная верстка *Н. В. Короткова*

Подписано в печать Формат 60х84 1/16.
Бумага типографская. Плоская печать. Усл. печ. л. 9,5.
Уч.-изд. л. 8,8. Тираж 100 экз. Заказ 5053.

Издательство Уральского университета
620000, г. Екатеринбург, ул. Тургенева, 4

Отпечатано в типографии ООО «Издательство УМЦ УПИ»
620062, г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2.
Тел.: (343) 362-91-16, 362-91-17

